

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR

EDIELY TEIXEIRA DA SILVA ALVES

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA SISTEMAS
DE ENGENHARIA QUÍMICA**

Curitiba

2011

EDIELY TEIXEIRA DA SILVA ALVES

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA SISTEMAS
DE ENGENHARIA QUÍMICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Modelagem, Simulação, Otimização e Controle de Processos, Departamento de Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof Dr. Marcelo Kaminski Lenzi

Curitiba

2011

À minha mãe Eunice

Aos meus tios Ana, Isabel, Josias e Judite

Pessoas que sempre me deram apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela realização dessa dissertação.

À minha mãe Eunice, pelo incentivo, confiança e amor incondicional.

Em especial ao professor. Dr. Marcelo Kaminski Lenzi, pela orientação, paciência, amizade e por tornar possível a execução desse trabalho. Ficam registrados meu respeito e amizade.

Aos familiares que me deram força durante o período de realização do mestrado. Em especial a Ana, Isabel, Josias e Judite.

Aos grandes velhos e novos amigos Dayane, Bruno, Ana Flávia, Andréa, Fulvy, Juliana B., Letícia, Sara, Silvana, Larize, Felipe e Rubens que estiveram ao meu lado nos mais variados momentos... Sempre com uma palavra amiga e sorrisos.

Aos professores da UFAL que me capacitaram como Engenheira Química.

Ao PPGEQ – UFPR, pela oportunidade de ingressar na carreira acadêmica e permitir o aprofundamento do meu conhecimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

RESUMO

Este trabalho propõe a aplicação da análise de imagem a sistemas de engenharia química, visando o monitoramento de processos e controle de qualidade. O resultado do trabalho desenvolvido contempla um sistema de análise de imagem digital com três aplicações específicas, envolvendo técnicas de aquisição e processamento das imagens adquiridas. A aquisição de imagem foi realizada dinamicamente, utilizando uma simples *webcam* que interage com o programa, e este realiza o processamento das imagens por meio de algoritmos de comparação simples pixel a pixel, baseado no modelo RGB de cores. A primeira aplicação corresponde à determinação de viscosidade da glicerina pelo método de Stokes; a segunda ao controle do nível de líquido em tanques; e a terceira aplicação a expansão da espuma de poliuretano durante sua formação. Para cada aplicação são apresentados resultados satisfatórios, de forma a concluir que o sistema desenvolvido é uma eficaz ferramenta para o monitoramento e controle de qualidade.

Palavras-chave: Análise de imagem, monitoramento de processos, webcam.

ABSTRACT

This study proposes the application of the image analysis for chemical engineering systems, aimed at process monitoring and quality control. The result of the work system comprises a digital image analysis with three specific applications involving techniques of acquisition and processing of acquired images. The image acquisition was performed dynamically using a simple webcam that interacts with the program, and it performs the image processing algorithms through a simple comparison pixel by pixel, based on the RGB color model. The first application one is the determination of viscosity of the glycerin by the method of Stokes, the second to control the liquid level in tanks and the third application is the expansion of polyurethane foam during its formation. For each application the satisfactory results are presented, to conclude that the system is an effective tool for monitoring and quality control.

Keywords: Image analysis, process monitoring, webcam

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 01 - DIAGRAMA APRESENTANDO AS ENTIDADES CHAVE EM UM CENÁRIO DE SISTEMA MONITORAMENTO AUTOMATIZADO. FONTE: BARBOSA (2004)..... | 19 |
| FIGURA 02 - UMA APROXIMAÇÃO (ZOOM) PARA EXEMPLIFICAÇÃO DOS PIXELS..... | 23 |
| FIGURA 03 - MODELO RGB – CUBO DE CORES. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 25 |
| FIGURA 04: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA <i>WEBCAM</i> TÍPICA. FONTE: LYRA (2008)..... | 30 |
| FIGURA 05 - DEMONSTRAÇÃO DO DESLIZAMENTO DA ESFERA NO FLUIDO. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 33 |
| FIGURA 06 - BALANÇO DE FORÇAS DE UMA ESFERA EM QUEDA LIVRE NO FLUIDO. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 33 |
| FIGURA 07 – MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DA GLICERINA POR ANÁLISE DE IMAGEM..... | 37 |
| FIGURA 08: ESQUEMA DO CENÁRIO DO SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 38 |
| FIGURA 09 - TELA DE ABERTURA DO PROGRAMA “VISCOSÍMETRO”..... | 39 |
| FIGURA 10 - TELA DO PROGRAMA “DADOS DE ENTRADA”..... | 41 |
| FIGURA 11 - TELA DO PROGRAMA “FILMAGEM & ANÁLISE”..... | 41 |
| FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DA ESTRUTURA DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGEM E DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE..... | 42 |
| FIGURA 13 – GRÁFICO DO RESULTADO DA VISCOSIDADE DA GLICERINA AVALIANDO A INFLUÊNCIA DA RAZÃO DT/DE NA MEDIDA...44 | 44 |
| FIGURA 14 – GRÁFICO DO RESULTADO DA VISCOSIDADE DA GLICERINA AVALIANDO A INFLUÊNCIA DO FILTRO DO PROGRAMA.....45 | 45 |
| FIGURA 15: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA SIMPLIFICADA DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE PROCESSO. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 47 |
| FIGURA 16: ILUSTRATIVO DO RELÉ DO CONTROLE ON-OFF. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 49 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 17 – MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE CONTROLE NÍVEL. (A) VISTA SUPERIOR DO TANQUE E LOCALIZAÇÃO DA <i>WEBCAM</i> PARA CAPTURAR AS IMAGENS; (B) VÁLVULA SOLENÓIDE E CONEXÕES ;(C) RELÉ; (D) PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS; (E) NOTEBOOK. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 51 |
| FIGURA 18 - ESQUEMA DO CENÁRIO DO SISTEMA PARA CONTROLE DE NÍVEL DE LÍQUIDO. FONTE: O AUTOR (2011)..... | 53 |
| FIGURA 19 - TELA DO PROGRAMA “CONTROLE DE NÍVEL”..... | 54 |
| FIGURA 20 - FLUXOGRAMA DA ESTRUTURA DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGEM E CONTROLE DO NÍVEL DE LÍQUIDO..... | 56 |
| FIGURA 21 - GRÁFICO DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DE LÍQUIDO. USO DE CONTROLADOR ON-OFF COM COMPORTAMENTO REGULATÓRIO..... | 57 |
| FIGURA 22 - GRÁFICO DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DE LÍQUIDO DO ENSAIO 1 NA REGIÃO DO <i>SET-POINT</i> | 58 |
| FIGURA 23 - GRÁFICO DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DE LÍQUIDO DO ENSAIO 1. AVALIAÇÃO DA ABERTURA DA VÁLVULA PELO CONTROLADOR ON-OFF COM COMPORTAMENTO REGULATÓRIO..... | 59 |
| FIGURA 24 - GRÁFICO DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DE LÍQUIDO DO ENSAIO 2. AVALIAÇÃO DA ABERTURA DA VÁLVULA PELO CONTROLADOR ON-OFF COM COMPORTAMENTO REGULATÓRIO..... | 59 |
| FIGURA 25 - GRÁFICO DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DE LÍQUIDO. USO DE CONTROLADOR ON-OFF COM COMPORTAMENTO SERVO..... | 60 |
| FIGURA 26 - GRÁFICO DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DE LÍQUIDO DO ENSAIO 1. AVALIAÇÃO DA ABERTURA DA VÁLVULA PELO CONTROLADOR ON-OFF COM COMPORTAMENTO SERVO..... | 61 |
| FIGURA 27: GRÁFICO DO MONITORAMENTO DO NÍVEL DE LÍQUIDO DO ENSAIO 2. AVALIAÇÃO DA ABERTURA DA VÁLVULA PELO CONTROLADOR ON-OFF COM COMPORTAMENTO SERVO..... | 62 |
| FIGURA 28 – REAÇÃO DE SÍNTESE DOS POLIURETANOS. FONTE: GOMES (2006)..... | 63 |
| FIGURA 29 – POLIOL POLIÉTER. FONTE: ALVES (2011) | 65 |
| FIGURA 30 – DIISOCINATO DE 4,4 DIFENILMETANO (MDI). FONTE: VILAR (2002)..... | 66 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 31 – ETAPAS DA FORMAÇÃO DA ESPUMA CONVENCIONAL: A) AR; B) POLIOL, ÁGUA E ADITIVOS; C) ISOCIANATO; D) MATÉRIAS-PRIMAS; E) MISTURA E NUCLEAÇÃO; F) CREME E INÍCIO DO CRESCIMENTO; G) CRESCIMENTO, H) SEPARAÇÃO DE FASE, SUSPIRO E GELIFICAÇÃO; I) CURA. FONTE: VILLAR (2002)..... | 66 |
| FIGURA 32 - POSICIONAMENTO DOS DOIS TERMOPARES NO TUBO (A) VISTA SUPERIOR MOSTRANDO O POSICIONAMENTO DO TERMOPAR EM RELAÇÃO AO CENTRO DO TUBO; VISTA LATERAL MOSTRANDO O POSICIONAMENTO DO TERMOPAR EM RELAÇÃO À BASE DA PROVETA..... | 69 |
| FIGURA 33 – FLUXOGRAMA DA ESTRUTURA DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGEM E MONITORAMENTO DA EXPANSÃO DA ESPUMA DE PU E REGISTRO DA TEMPERATURA..... | 71 |
| FIGURA 34 – FLUXOGRAMA DA ESTRUTURA DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGEM E MONITORAMENTO DA EXPANSÃO DA ESPUMA DE PU E REGISTRO DA TEMPERATURA..... | 71 |
| FIGURA 35 – IMAGEM DO PROGRAMA COMPUTACIONAL NO MOMENTO DE MONITORAMENTO DA EXPANSÃO DA ESPUMA..... | 72 |
| FIGURA 36 – VARIAÇÃO DA ALTURA E TEMPERATURA DURANTE O PROCESSO DE FORMAÇÃO DA ESPUMA DE PU..... | 73 |
| FIGURA 37 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DA ALTURA E DENSIDADE DURANTE O PROCESSO DE FORMAÇÃO DE ESPUMA DE PU..... | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 01 - TABELA 01 - RESULTADO DA VISCOSIDADE MÉDIA DA GLICERINA BIDEDESTILADA SOB INFLUÊNCIA DE RD À TEMPERATURA DE 24 ± 1 °C..... | 44 |
| TABELA 02 - DESCRIÇÃO DETALHADA DAS ETAPAS DE FORMAÇÃO DA ESPUMA. FONTE: VILAR (2002) | 67 |
| TABELA 03 – FORMULAÇÃO DAS ESPUMAS..... | 69 |

LISTA DE SIGLAS

BBO - *Bassin, Bousinesq & Ossen*

RD - Relação entre os diâmetros do tubo e esfera

RD1 - Relação entre os diâmetros do tubo e esfera no ensaio 1

RD2 - Relação entre os diâmetros do tubo e esfera no ensaio 2

RGB – *Red, Green and Blue*

ROI - *Region of Interest*

NOMENCLATURA

| | |
|--------------|---|
| $f(x,y,t_i)$ | – Função da imagem no instante t_i |
| $f(x,y,t_j)$ | - Função da imagem no instante t_j |
| t_i | – Tempo t_i |
| t_j | – Tempo t_j |
| θ | – Intervalo de luminância |
| $d(x,y)$ | – Função de nova imagem |
| $(x_0;y_0)$ | –Coordenada do centro de massa do objeto na imagem no instante t_0 |
| $f(t_0)$ | – Função da imagem no instante t_0 |
| t_0 | – Tempo t_0 |
| $(x_1;y_1)$ | - Coordenada do centro de massa do objeto na imagem no instante t_1 |
| $f(t_1)$ | - Função da imagem no instante t_1 |
| t_1 | - Tempo t_1 |
| v | – Velocidade de movimento do objeto na imagem |
| $f(x,y)$ | – Função da imagem |
| $i(x,y)$ | – Função da luminância da imagem |
| $r(x,y)$ | – Função da reflectância da imagem |
| M | – Número de linhas da matriz de imagem |
| N | - Número de colunas da matriz de imagem |
| g | – Aceleração da gravidade |
| D_e | – Diâmetro da esfera |
| ρ_e | - Densidade da esfera |
| ρ_f | - Densidade do fluido |
| μ | - Viscosidade do fluido |
| V | - Velocidade da esfera no fluido |
| dv/dt | - Aceleração da esfera |

τ - Tensão de cisalhamento

Re_D - Número de Reynolds

C_D - Coeficiente de arrasto

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 2.1. ANÁLISE DE IMAGEM | 17 |
| 2.2. SISTEMAS DE MONITORAMENTO | 18 |
| 2.3. DETECÇÃO DE MOVIMENTO | 20 |
| 2.3.1. Comparação Simples | 20 |
| 2.3.2. Cálculo de Velocidade | 21 |
| 2.4. IMAGEM DIGITAL | 22 |
| 2.4.1. Definição Matemática de Imagem | 24 |
| 2.4.2. Modelo RGB de Cores | 25 |
| 2.5. AQUISIÇÃO DA IMAGEM | 26 |
| 2.5.1. Dispositivo de aquisição | 26 |
| 2.6. ANÁLISE DE IMAGEM NO CONTEXTO DA ENGENHARIA QUÍMICA | 29 |
| 3. DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE | 32 |
| 3.1. VISCOSÍMETRO DE STOKES | 32 |
| 3.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA | 36 |
| 3.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 37 |
| 3.4. PROGRAMA EM DELPHI® | 39 |
| 3.5. RESULTADOS | 43 |
| 3.5.1. Viscosidade Sob a Influência de RD | 43 |
| 3.5.2. Viscosidade Sob a Influência do Filtro do Programa | 45 |
| 4. CONTROLE DE NÍVEL EM TAQUE DE LÍQUIDO | 46 |
| 4.1. CONTROLE DE PROCESSO | 47 |
| 4.1.1. Controle On-off | 49 |
| 4.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA | 50 |
| 4.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 52 |
| 4.4. PROGRAMA EM DELPHI® | 53 |
| 4.5. RESULTADOS | 56 |

| | |
|---|-----------|
| 4.5.1. Monitoramento do Nível para Controlador com Comportamento Regulatório..... | 58 |
| 4.5.2. Monitoramento do Nível para Controlador com Comportamento Servo..... | 61 |
| 5. EXPANSÃO DA ESPUMA DE POLIURETANO..... | 64 |
| 5.1. POLIOL..... | 65 |
| 5.2. ISOCIANATO..... | 66 |
| 5.3. ETAPAS DE FORMAÇÃO DA ESPUMA DE POLIURETANO..... | 66 |
| 5.4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA..... | 68 |
| 5.5. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO..... | 70 |
| 5.6. PROGRAMA EM DELPHI®..... | 71 |
| 5.7. RESULTADOS..... | 73 |
| 6. CONCLUSÃO..... | 76 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 78 |
| ANEXO 01..... | 83 |
| ANEXO 02..... | 86 |

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de controle em tempo real são de fundamental importância para a competitividade de processos químicos em geral, tendo em vista a produção elevada com qualidade desejada, mantendo baixos custos operacionais. No entanto, a disponibilidade de técnicas de monitoramento de processos representa nos dias atuais um dos principais gargalos para a implementação de sistemas de controle em tempo real.

A análise de imagem é, neste momento, uma ferramenta que vem crescendo fortemente entre as técnicas de monitoramento de processos, devido ao desenvolvimento de sistemas de imagens de alta performance e ao aumento exponencial da capacidade dos computadores, bem como a diminuição do preço de aquisição.

No setor industrial, a análise de imagem é aplicada a sistemas de sensoriamento automático em malhas de inspeção e controle, detecção de padrões e estruturas (BRANDSTETTER & BUCAR, 2008; BARBOSA, 2004), permitindo a observação contínua ou periódica do desenvolvimento de um procedimento qualquer, seja para controlar ou mesmo verificar determinadas características, ou seja, identificar algum evento específico referente ao cenário (BALABAN, 2008; STIEN et. al., 2006).

Devido à exigência na demanda de qualidade de produtos, os sensores de medição indireta não podem prover todas as informações necessárias. Uma informação bi, tri ou tetradimensional (incluindo o tempo) é necessário para determinar, em alguns casos, o estado do processo. A tecnologia da imagem fornece essa dimensionalidade de forma mais avançada.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal evidenciar a aplicação da análise de imagem na área da engenharia química. Baseando-se na implementação de um sistema, que por meio da imagem processada, realiza os cálculos para determinar a viscosidade de fluidos newtonianos pelo método de Stokes; controla o nível de líquido em tanques e monitora a superfície de espumas de poliuretanos, bem como, relacionar sua temperatura e a perda de peso durante a formação da espuma.

Para alcançar o objetivo principal de desenvolver um programa de análise de imagem que coordene e controle tais tarefas, as seguintes etapas foram realizadas:

- Estudo de técnicas de processamento, análise de imagens e suas aplicações em sistemas de monitoração de processos;
- Implementação de um programa de aquisição e tratamento de imagens utilizando Delphi 6;
- Levantamento dos métodos utilizados a cada tarefa, bem como, os materiais e instrumentos para realizar a comunicação com o programa;
- Validação do sistema de análise de imagem por meio de testes experimentais, levando em consideração a importância da análise estatística dos resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre aplicação análise de imagem na engenharia química. Além disso, é feita uma revisão sobre princípios fundamentais da técnica. Por fim, é apresentada uma análise da revisão bibliográfica, ressaltando as contribuições deste trabalho.

3.1. ANÁLISE DE IMAGEM

Os sistemas de análise de imagens digitais resultam da integração de diversas tecnologias e são aplicadas em diferentes áreas como, medicina, petróleo, robótica, geografia, industrial e etc (BOVIK, 2005), na maioria das vezes por se tratar de sistemas em que a visão humana não alcança.

Para melhor compreender a vasta área de análise de imagens é importante conhecer o conceito de ROI (*“Region of Interest”* - Região de Interesse), ou seja, uma parte específica da imagem que é definida por algoritmos de segmentação (automaticamente) ou por interação do usuário, que contém as informações relevantes a serem processadas (ALBUQUERQUE, 2002).

O termo análise está relacionado com a extração de informações da região de interesse, informações estas, ou parâmetros, que na maioria dos casos, são quantificadas em relação de porcentagem. Sendo possível, ainda na análise, a saída do sistema não ser uma imagem, mas sim um gráfico ou um valor referente à propriedade da imagem a que se deseja estimar.

Segundo MENDES (2008), as técnicas à análise de imagens são dependentes da complexidade e do tempo de resposta que envolve o problema. No entanto, como um sistema computacional não possui a mesma

capacidade de distinção de objetos de um humano, os algoritmos interagem sobre os *pixels* (elemento de imagem) de forma a separar parâmetros da região de interesse, ou seja, isolar os objetos do fundo, com o intuito de obter medidas específicas, como área, perímetro, posição na imagem, texturas, quantidade de elementos, classificação e reconhecimento de formas, que melhor se adequam ao resultado esperado.

Ao fim deste processamento é a parte da análise que apresentará resultados de forma quantitativa, chamado de parametrização (GONZALEZ & WOODS, 2002; RUSS, 1995, DOUGHERTY, 1994), que identifica e calcula parâmetros nos objetos segmentados. Esses resultados, por exemplo, podem ser o diâmetro de uma partícula, o volume de líquido em um tanque, entre outros.

Descrições semelhantes envolvendo os conceitos, características e aplicação do processamento e análise de imagem digital são encontradas na literatura da área (PRATT, 2007; BOVIK, 2005; ALBUQUERQUE, 2002; CASTLEMAN, 1996).

3.2. SISTEMAS DE MONITORAMENTO

De acordo com BARBOSA (2004), sistemas de monitoração de processos têm como finalidade a observação contínua ou periódica do desenvolvimento de um procedimento qualquer, seja para controlar ou mesmo verificar determinadas características do mesmo, seja para identificar algum evento específico referente ao cenário em questão.

Esses sistemas são então, em geral, classificados como Sistemas de Tempo Real, uma vez que devem reagir a estímulos oriundos do seu ambiente em prazos específicos.

O atendimento desses prazos resulta em requisitos de natureza temporal sobre o comportamento desses sistemas. Em consequência, em cada reação, o sistema de tempo real deve entregar um resultado correto dentro de um prazo específico, sob pena de ocorrer uma falha temporal. O comportamento correto de um sistema de tempo real, portanto, não depende só da integridade dos resultados obtidos, mas também dos valores de tempo real em que são produzidos. Descrições semelhantes de sistemas de tempo real são encontradas na literatura da área (BAOXIN & CHELLAPPA, 2001; BUTTAZO, 1997; AUDSLEY, 1993; KOPETZ, 1992).

A necessidade de processamento em tempo real está intimamente ligada com o número de frames por segundo capturadas pela câmara. Por vezes, uma mera redução da taxa de captura viabiliza o requisito de tempo real, visto que terão de ser processadas menos imagens num mesmo intervalo de tempo. No entanto, não se pode reduzir esta taxa em demasia, porque pode cometer-se o erro de perder informação importante. Por exemplo, num sistema em que é necessário seguir o movimento de um objeto é importante não baixar em demasia a taxa de captura, de forma a garantir o correto acompanhamento da trajetória efetuada.

Grande parte dos cenários nos quais se enquadram sistemas de tempo real podem ser descritos conforme mostra a Figura 01, apresentando 5 pontos chave: o sistema a controlar, a interface de instrumentação, o sistema computacional de controle, a interface homem-máquina e o operador (FARINES et. al., 2004).

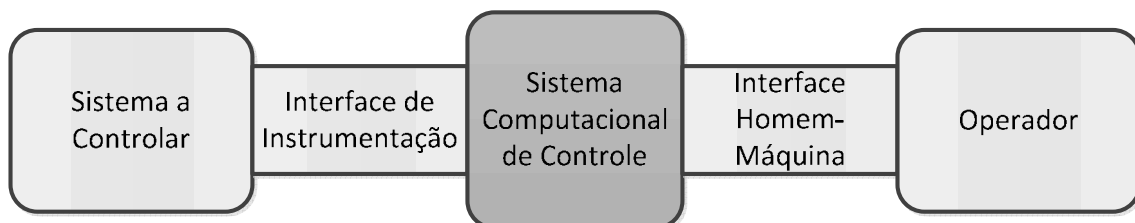


FIGURA 01 - Diagrama apresentando as entidades chave em um cenário de sistema monitoramento automatizado. FONTE: BARBOSA (2004)

A monitoração de um processo, por mais simples que ele seja, implica, mesmo que implicitamente, a consideração do quesito tempo, seja na descrição do intervalo ao longo do qual o sistema opera, seja na representação dos momentos em que determinados eventos de interesse ocorrem. Conclui-se então, que requisitos temporais são absolutamente inerentes a sistemas de monitoração de processos.

3.3. DETECÇÃO DE MOVIMENTO

Em sistema dotado de interação por análise de vídeo todo o processamento tem impreterivelmente de ser realizado em tempo real, para que as ordens dadas pelo sistema a controlar sejam interpretadas de imediato.

Nesses casos, a movimentação de um determinado objeto em um ambiente é essencial para sua identificação e extração informações. Tendo isto em vista, nesta seção será apresentado o método de detecção de movimento em imagens por comparação simples.

3.3.1. Comparação Simples

Este método baseia-se na computação da diferença absoluta entre duas imagens pixel a pixel. Para tanto, cria-se uma nova imagem d que represente um identificador de pontos distintos entre as duas imagens em questão. Considere $f(x,y,t_i)$ e $f(x,y,t_j)$ quadros capturados nos instantes t_i e t_j , respectivamente. Seja θ um valor positivo contido no intervalo de luminâncias representáveis nas duas imagens. De acordo com BARBOSA (2004), define-se $d(x, y)$ pela Equação 01.

$$d(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } |f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j)| > \theta \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (01)$$

O cenário ideal para a aplicação desta técnica é aquele no qual é possível se obter uma imagem do ambiente na qual constam apenas os elementos estacionários. Desta forma, utiliza-se esta imagem para comparação e identificação de qualquer objeto que se mova, saindo, portanto, de sua condição estacionária.

Esta técnica, embora amplamente utilizada, é bastante vulnerável à ocorrência de ruídos, sejam eles oriundos de variação de iluminação ou do próprio dispositivo de captação de imagens. O tratamento para esse tipo de problema consiste da aplicação de filtro (BARBOSA, 2004).

3.3.2. Cálculo de Velocidade

Outro aspecto inerente a aplicações de detecção de movimento é o que diz respeito ao cálculo da velocidade do objeto ou cenário em deslocamento na imagem, principalmente em sistemas de controle de tráfego de veículos ou de determinados processos industriais.

De acordo com BARBOSA (2004) é importante ressaltar, porém, que a abordagem apresentada a seguir para o cálculo da velocidade é aplicável apenas a situações nas quais a distância focal dos objetos em movimento é conhecida e fixa.

Para realizar tal tarefa, deve-se, antes de qualquer coisa, estabelecer uma relação entre o número de *pixels* da imagem e a distância real no local alvo da filmagem. Desta forma, a velocidade de movimento pode ser calculada

em *pixels/tempo*, sendo então realizada uma operação de conversão para a unidade desejada.

Para determinar o deslocamento de um objeto, o primeiro passo consiste da segmentação do mesmo da imagem, sendo possível então o cálculo do seu centro de massa. Considerando $(x_0; y_0)$ o centro de massa do objeto segmentado na imagem $f(t_0)$, obtida no instante t_0 , e $(x_1; y_1)$ o centro de massa do objeto segmentado na imagem $f(t_1)$, obtida no instante t_1 , o cálculo da velocidade seria realizado conforme indica a Equação 02.

$$v = \frac{|x_1 - x_0|}{t_1 - t_0} \text{ pixels / tempo} \quad (02)$$

Outra maneira de realizar o cálculo da velocidade reside no domínio da frequência, esta é baseada na Transformada de Fourier. Maiores informações sobre a mesma podem ser encontradas em (GONZALEZ & WOODS, 2002).

3.4. IMAGEM DIGITAL

Uma das definições de imagem pode ser entendida como uma representação visual de um objeto, ou seja, uma estruturação em um plano, que permite a percepção de intensidades e profundidades dos sinais luminosos refletidos ou emitidos por um objeto do mundo real (GONZALEZ & WOODS, 2002).

Como um computador não é capaz de processar imagens contínuas, pois este trabalha com números discretos, se faz necessário que as imagens sejam, primeiramente, convertidas em números na forma de matriz como arranjos bidimensionais de pontos.

Para fazer a conversão de imagem em números, a imagem, como se observa na Figura 02, é subdividida em uma grade, contendo milhões de quadrados de igual tamanho, sendo cada um deles associado a um valor numérico da intensidade da cor naquele ponto. Cada quadrado na imagem é denominado *pixel* (elemento de imagem) (ALBUQUERQUE, 2002; SANGWINE & REN, 1998). Os valores desses *pixels* representam uma discretização da intensidade luminosa captada por uma determinada área, variando em valores ou porcentagem, dependendo do espaço de cor utilizado (GONZALEZ & WOODS, 2002).

A orientação do sistema de coordenadas mais utilizada no processamento de imagem é com a origem do sistema localizada no canto superior esquerdo. Essa localização preferencial para o canto superior esquerdo, com eixo *y* invertido em relação ao padrão da matemática, é herdada dos próprios dispositivos de visualização, onde a primeira linha a ser redesenhada na tela é a do topo da tela, que segue o padrão de escrita ocidental, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

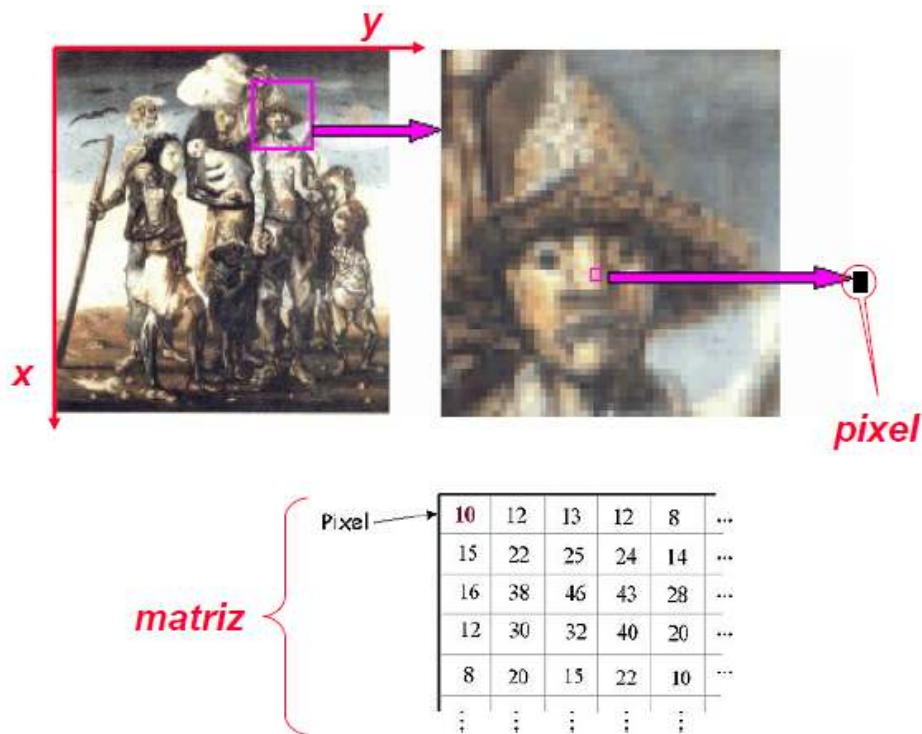


FIGURA 02 - Uma aproximação (zoom) para exemplificação dos *pixels*.

3.4.1. Definição Matemática de Imagem

Segundo (CARVALHO, 2003), uma imagem pode ser definida matematicamente como uma função bidimensional de intensidade da luz $f(x,y)$, em que o valor nas coordenadas espaciais x e y é uma combinação de duas componentes: luminância $i(x,y)$ e reflectância $r(x,y)$, conforme apresentado na Equação 03 (DIAS, 2009):

$$f(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y) \quad (03)$$

Em que,

$$0 < i(x,y) < \infty \quad (04)$$

$$0 \leq r(x,y) \leq 1 \quad (05)$$

No qual a Equação 04 referente a luminância, depende da quantidade de luz incidente sobre o cenário em questão e a Equação 05 referente a reflectância é limitada à total absorção da luz pelos objetos ($r=0$) ou à total reflexão dos raios luminosos ($r=1$), dependente das características superficiais dos objetos observados (CARVALHO, 2003; GONZALEZ & WOODS, 2002).

A maneira de representar digitalmente uma imagem é na forma de uma matriz com M linhas (altura da imagem) e N colunas (largura da imagem), apresentando o formato da Equação 06.

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (06)$$

Os elementos da matriz $f(x,y)$ são definidos nos inteiros não negativos entre 0 e 255, que pode ser definido apenas por um único valor - imagem monocromática, ou por um conjunto de valores dentro de um modelo de cores, como por exemplo o sistema de cores RGB (*Red, Green and Blue*).

3.4.2. Modelo RGB de Cores

Um modelo de cor é uma especificação em um sistema tridimensional de coordenadas e um sub espaço deste sistema onde cada cor é representada por um único ponto (GONZALEZ & WOODS, 2002). Segundo SANGWINE & REN (1998), muitos modelos de cores utilizados hoje foram criados objetivando hardware, tais como, monitores e impressoras, outros foram criados para aplicações onde a manipulação de cores é o foco.

Quando a imagem utiliza o espaço vetorial RGB (*Red, Green and Blue*), o valor de $f(x,y)$ é um vetor com 3 componentes, correspondendo ao R, G e B, assim cada pixel é associado a um conjunto três valores para representar uma cor (KOYA, 2001; CASTLEMAN,1996). O subespaço de cores de interesse pode ser representado pelo cubo ilustrado na Figura 03.

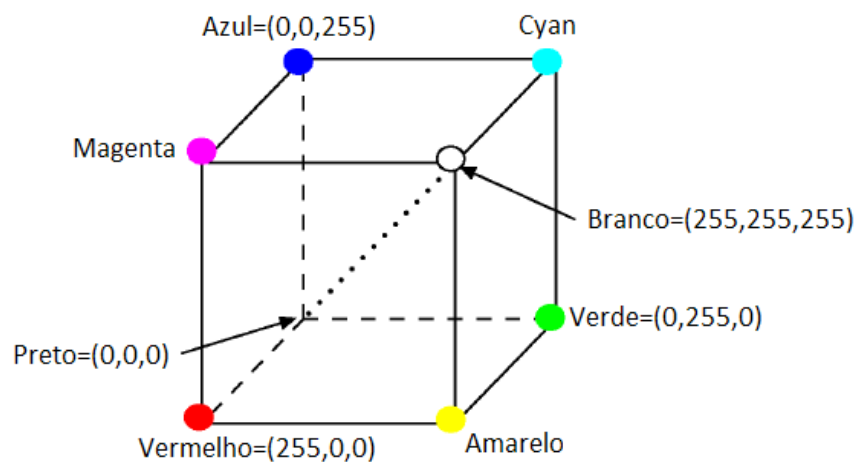


FIGURA 03 - Modelo RGB – Cubo de cores. FONTE: O autor (2011)

No modelo RGB a representação utilizada é a de 8 bits para cada canal de informação, fazendo um total de 24 *bits* por *pixel*. Com isso é possível gerar mais de 16 milhões de cores diferentes (KOYA, 2001).

Neste trabalho usamos o sistema de cores RGB, ou seja, um conversor de 8 *bits* que pode assumir valores de 0 (zero) à 255, assim cada *pixel* pode assumir um entre 16.777.216 ($2^8 \times 2^8 \times 2^8$) valores possíveis de cor.

3.5. AQUISIÇÃO DA IMAGEM

Com um instrumento de aquisição, a imagem é adquirida por um processo de varredura cobrindo cada elemento da imagem (*pixel*). O sinal de vídeo (analógico ou digital) emitido pelo pixel é enviado ao computador, e no caso de sinal de vídeo analógico é convertido em digital. Este valor digital é armazenado na memória e, finalmente, é processada (FAZANO, 2005).

Os sistemas de aquisição variam conforme a aplicação para qual são destinados. Diferenças são encontradas quanto ao princípio de aquisição, a velocidade ou taxa de aquisição, a resolução das imagens adquiridas, o sistema de sensoriamento e a frequência do espectro luminoso utilizada.

3.5.1. Dispositivo de Aquisição

Para obtenção de imagens digitais são necessários dois elementos: dispositivos físicos captadores de imagem e digitalizador. Dispositivos físicos são sensíveis a espectros de energia eletromagnética e o digitalizador converte o sinal elétrico desses dispositivos para o formato digital (CARVALHO, 2003).

Existem diversos dispositivos físicos captadores de imagem. Os mais conhecidos são o *scanner* e a câmera de vídeo. Sendo, a câmera de vídeo o dispositivo visual mais comum em monitoração de processos.

As câmeras digitais são semelhantes às câmeras analógicas em suas características básicas, mas produzem um sinal de vídeo de saída já digitalizado para transferência das imagens adquiridas, dispensando o uso de uma placa de aquisição (CAPPELARO et al., 2007). Várias vantagens podem ser mencionadas, como o sinal digital é bem mais robusto em relação ao sinal analógico, permitindo altas taxas de transferência de dados, sendo praticamente imune a ruídos eletromagnéticos, suportando aquisição de imagens com alta resolução e maiores níveis de contraste de cores ou tons de cinza (de 8 a 16 bits). Estas câmeras são mais propícias para aplicações de maior resolução e velocidade, além de serem mais adequadas às condições agressivas do ambiente industrial.

Uma alternativa às câmeras digitais e uma das propostas deste trabalho corresponde ao uso da webcam como dispositivo de aquisição.

A *webcam* é uma câmera de vídeo de baixo custo que captura imagens digitais, transferido-as para o computador de modo quase instantâneo.

Ademais, tem como vantagens uma câmera digital colorida com possibilidade de ser *progressive scan* e transmissão de imagens via porta USB por um preço extremamente baixo. Tornando-se uma atrativa opção para os sistemas de visão, inclusive aqueles aplicados em ambientes industriais. A Figura 04 mostra o diagrama esquemático de uma *webcam* típica.

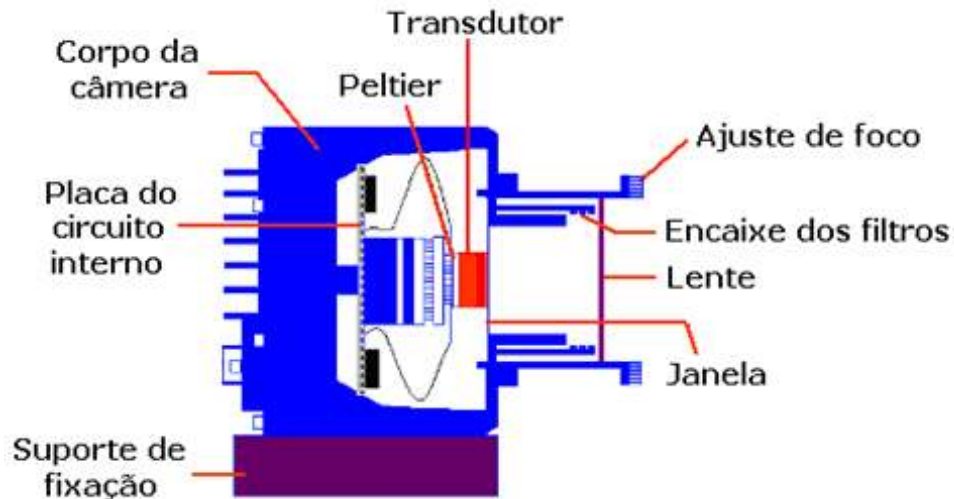


FIGURA 04: Representação esquemática de uma *webcam* típica. FONTE: LYRA (2008)

A seguir são descritos os componentes de uma *webcam* e suas funções:

Lentes: possuem a função de concentrar os feixes de radiação tornando-os paralelos (lentes colimadoras).

Ajustador de foco: proporciona uma maior nitidez e realça algum detalhe durante a captura da imagem.

Filtros: destinados à seleção da região espectral de interesse. Caso se queira selecionar a região visível do espectro eletromagnético deve-se usar um filtro de corte para as regiões ultravioleta e infravermelha.

Janela: elemento que delimita a abertura máxima do obturador.

Peltier: dissipa o calor gerado pelo sensor de imagem, pois quando uma diferença de potencial é gerada no sensor forma-se um gradiente de temperatura no mesmo.

Placa de circuito: concentra os diferentes componentes eletrônicos usados no processamento e armazenamento dos dados coletados pelo sensor de imagem.

Transdutor de Imagem: dispositivo que monitora a radiação incidente de forma contínua e reversível para aquisição de imagens.

3.6. ANÁLISE DE IMAGEM NO CONTEXTO DA ENGENHARIA QUÍMICA

A análise de imagens, que antigamente era apenas visual, para apenas certos tipos de medições e contagens, hoje se tornou bastante mais complexa, sendo automática e digital. O uso de análise de imagens como ferramenta de auxílio em processos na indústria tem se tornado cada vez mais freqüente, pois esta permite a realização de medidas que antes não seriam praticáveis.

No caso da indústria de processos químicos, a tecnologia de imagem pode ser encontrada em uma gama significativa de aplicações, tal como: fluxo multifásico em três dimensões; no desenvolvimento e controle de sistemas de combustão; na detecção e medição do tamanho e forma de partículas; uniformidade de mistura, taxa de fluidização, eficiência do processo e vários fatores relacionados a qualidade do produto; na separação de partículas por colunas e células de flotação; na imagem térmica para monitorar perfis de fluxo e entre outros (SCOTT & MCCANN, 2005).

A seguir, serão reportados alguns trabalhos envolvendo os três casos que serão abordados neste trabalho: I) Determinação da viscosidade; II) Monitoramento do nível de líquido e III) Velocidade/Cinética de expansão na produção de espumas poliuretânicas.

I) Determinação da viscosidade

OLIVEIRA et. al. (2009) apresentam um ambiente que realiza os cálculos para determinação da viscosidade de um líquido pelo método de Stokes, formado por uma maquete experimental, um circuito eletrônico que a automatiza e uma ferramenta que controla o circuito. No entanto, são utilizados sensores de infravermelho para captar o momento de passagem da esfera pela região de interesse. A técnica proposta mostrou-se satisfatória e interessante no controle do experimento de viscosidade.

II) Monitoramento e controle do nível de líquido

BARBOSA (2004) propõe a construção de um sistema capaz de monitorar a variação do volume de petróleo armazenado no frasco coletor da unidade de destilação. O resultado foi bem sucedido, principalmente no que diz respeito à detecção de movimento por comparação simples, forma a qual se determinou o nível de líquido. Vale ressaltar também a contribuição desse trabalho na abordagem às técnicas de processamento de imagem digital.

FERNANDES (2009) propõe um sistema de controle de nível para interface de separação a partir da aquisição e tratamento de imagens obtidas dinamicamente por uma *webcam*. A estratégia utilizada foi eficaz no monitoramento da interface.

DIAS (2009) apresenta a implantação de um sistema de visão para a medição do nível de líquido em garrafas no processo de envasamento de líquidos. O autor utilizou processamento digital de imagens como suporte ao controle desta propriedade no processo. A proposta apresentou-se viável técnica e economicamente, haja vista que sistema é formado por um motor de passo, placa de aquisição de imagem, *webcam* e computador.

WANG et. al. (2009) propõem um sistema de medição de nível de líquido usando uma câmera digital e uma bóia circular para medir os níveis de líquido de reservatórios.

III) Relação entre a expansão da espuma de poliuretano com a temperatura e a densidade durante sua formação

KHAKHAR & HARIKRISHNAN (2010) apresentaram um modelo para formação de espumas de poliuretano flexíveis a fim da predição da abertura de suas células. Os autores utilizaram um sistema adiabático para formação da espuma. Para obtenção dos parâmetros cinéticos da reação foi registrada a temperatura durante o processo de formação. Também foi avaliado pelos autores a variação de densidade da espuma, baseada na perda de peso da espuma durante sua formação. De posse dos resultados cinéticos, densidade e

viscosidade foi avaliada a espessura de abertura das células para espumas flexíveis por meio da gravação de vídeo por microscopia eletrônica.

Desta forma, ressalta-se que a aplicação da técnica da análise de imagem vinculada ao uso da *webcam* leva ao desenvolvimento de sistemas de baixo custo para o monitoramento de sistemas de engenharia química.

4. DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE

A viscosidade é uma das variáveis que caracteriza reologicamente uma substância, sendo de fundamental importância para a consecução das etapas de projeto de equipamentos e de processos, ou mesmo, para especificação do produto.

Normalmente, quando se necessita saber a viscosidade usa-se a medição indireta por meio de amostragem e análise laboratorial. Porém, devido à automação dos processos e a fim de evitar contaminações, fazem-se necessárias medições na linha de processo (*inline*).

Além disso, a automatização das medições e a elaboração dos dados de experimento, hoje não se restringem apenas à indústria e pesquisa científica e, cada vez mais, tem sido introduzida também nas práticas laboratoriais acadêmicas.

Em virtude dos fatos relacionados, a análise de imagem é uma técnica interessante por se tratar de um método relativamente robusto, preciso, não destrutivo (RUSS, 1995). Para validação da técnica foi utilizada a glicerina bidestilada USP (Farmaquil) como fluido de análise.

4.1. VISCOSÍMETRO DE STOKES

A viscosidade (BARNES et al.,1989) pode ser definida como o atrito interno ocasionado no deslizamento de camadas fluidas umas sobre outras, dando origem a tensões tangenciais. Como resultados deste deslizamento surgem as forças: peso, empuxo e a força de arrasto. Sendo, as duas últimas dirigidas em sentido oposto da velocidade do movimento como demonstra a Figura 05.

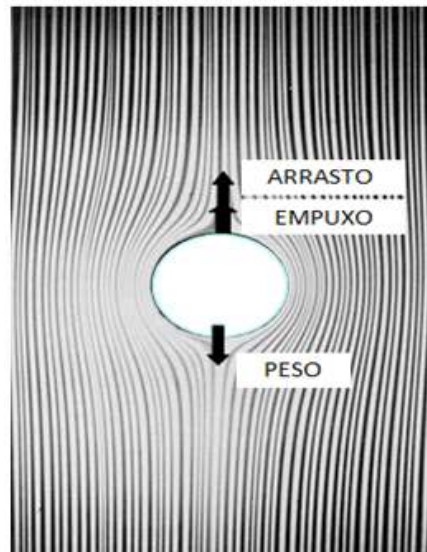


FIGURA 05 - Demonstração do deslizamento da esfera no fluido.
FONTE: O autor (2011)

O princípio operacional do viscosímetro de Stokes, baseia-se na determinação da velocidade de queda livre de uma esfera através de um fluido NEWTONIANO. A Figura 06 ilustra o processo e o balanço das forças em uma esfera em queda livre no fluido.

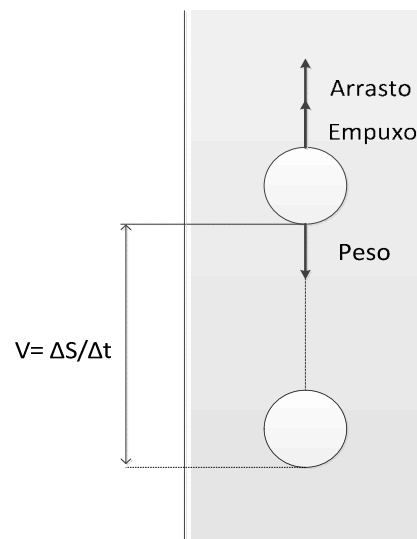


FIGURA 06 - Balanço de forças de uma esfera em queda livre no fluido.
Fonte: O autor (2011)

A esfera, sendo lançada no fluido estacionário, estará sujeita a um conjunto de forças definidas pela Equação 07, denominada “BBO” - Bassin, Bousinesq & Ossen (HINZE, 1959):

$$\underbrace{\frac{\pi}{6} \cdot D_e^3 \cdot \rho_e \frac{dv}{dt}}_{\text{aceleração da esfera}} = \underbrace{3\pi \cdot \mu \cdot D_e \cdot V}_{f. \text{ arrasto}} - \underbrace{\frac{\pi}{12} \cdot D_e^3 \cdot \rho_f \frac{dv}{dt}}_{\text{massa virtual}} - \underbrace{\frac{3}{2} D_e^2 \sqrt{\pi \cdot \rho_f \cdot \mu} \int_0^t \frac{dv}{dt} \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}}_{f. \text{ de basset}} + \underbrace{\frac{\pi}{6} D_e^3 (\rho_e - \rho_f) g}_{\text{empuxo-peso}} \quad (07)$$

Em que as variáveis g , D_e , ρ_e , ρ_f , μ , V e dv/dt são respectivamente, a aceleração da gravidade, o diâmetro da esfera, as densidades da esfera e do fluido, viscosidade do fluido, velocidade da esfera, a aceleração da esfera.

Neste viscosímetro, quando a esfera atinge a velocidade terminal, isto é, dv/dt é nulo. A Equação 07 se reduz, então, a um balanço entre a força de arrasto e a diferença entre a força peso e o empuxo, conforme foi apresentado na Figura 06.

Segundo WHITE (1991), a força de arrasto pode ser expressa em termos do coeficiente de arrasto pela Equação 08.

$$C_D = \frac{3\pi \cdot \mu \cdot D_e \cdot v}{\frac{\rho_f \cdot v^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4}} \equiv \frac{24}{Re_D} \quad (08)$$

Em que o número de Reynolds, Re_D , é dado pela Equação 09.

$$Re_D = \frac{\rho_f \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (09)$$

Substituindo a Equação. 08 e 09 na Equação 07 o balanço de forças para o escoamento permanente dado pela Equação 10, conhecida como Equação de Stokes. Ela é considerada um dos grandes sucessos na área de Mecânica dos Fluidos, pois prevê, com precisão, o arrasto de uma esfera a partir de fundamentos teóricos. Evidentemente a validade da solução é restrita a escoamentos com ausência de inércia, isto é, para regimes com Reynolds inferiores à unidade.

$$C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_f \cdot v^2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = \frac{\pi D^3 \cdot \mu}{6} (\rho_e - \rho_f) g \quad (10)$$

Deve-se ressaltar que Eq. (10) aplica-se apenas para um meio infinito. A presença das paredes do viscosímetro causa um aumento no coeficiente de arrasto e deve ser corrigido como proposto por BRODKEY (1967), apresentado na Equação 11.

$$C_D = \frac{24}{Re_D} \left(1 + 2,4 \frac{D_e}{D_t} \right) \quad (11)$$

Sendo, D_t é o diâmetro do tubo do viscosímetro.

Logo, substituindo Equação 11 na Equação 10, e resolvendo-a para μ , obtém-se a Equação 12, expressão da viscosidade para o viscosímetro de Stokes (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

$$\mu = \frac{1}{18} \frac{D_e^2 \cdot g}{v} \frac{(\rho_e - \rho_f)}{\left(1 + 2,4 \frac{D_e}{D_t} \right)} \quad (12)$$

Desta forma, analisando a Equação 12 chega-se à conclusão que, para determinar a viscosidade de um fluído newtoniano, é necessário saber a

velocidade de queda da esfera. Com deslocamento conhecido e detectando-se o tempo que a esfera gasta para perfazer o caminho, é simples obter a velocidade de queda, haja vista que o movimento da esfera é uniforme no líquido. Já as demais variáveis são conhecidas *a priori*.

Com este intuito, é proposto um sistema de análise de imagem capaz de realizar o monitoramento da esfera durante sua queda livre no fluido em análise, fazendo com que a viscosidade do fluido seja determinada.

4.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Os itens listados abaixo dizem respeito aos componentes e matérias utilizados para validar o sistema proposto, também apresentado na Figura 07.

- Um viscosímetro composto por uma proveta volumétrica e uma esfera. Foi utilizado uma proveta de 250, 500 e 1000 mL cada uma delas com diâmetro médio de $3,366 \pm 0,003$ cm, $4,437 \pm 0,003$ cm e $6,155 \pm 0,005$ cm, respectivamente. As esferas utilizadas foram de vidro com diâmetro médio de $2,07 \pm 0,01$ cm. As medidas de diâmetros foram realizadas utilizando um paquímetro digital (JOMARCA). Fluido em análise – glicerina bidestilada USP (farmaquil).
- Uma webcam Clone® 10028, responsável pela captura da imagem, que tem como características: resolução de captura de vídeo digital 640x480 pixels, taxa de até 30 frames por segundo e interface USB.
- Um computador para executar o programa desenvolvido a fim de realizar a aquisição e análise de imagem.



FIGURA 07 – Materiais e equipamentos utilizados no ensaio de determinação da viscosidade da glicerina por análise de imagem.

Os experimentos para validação do sistema foram realizados no LESF (Laboratório de Engenharia de Sistemas Fracionários) do PPGEQ/UFPR e no Laboratório de Pesquisa Experimental do PPGEQ.

4.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A tarefa chave do sistema consiste no monitoramento da posição da esfera no líquido. Para realizar tal tarefa, o programa computacional desenvolvido em Delphi®, baseado no sistema de cores RGB e no método de comparação simples para detecção do movimento, coordena a captura de imagem pela *webcam* e sua comparação aos registros de dados e imagens.

A *webcam* foi posicionada na altura da base da proveta na posição oposta, com inclinação que capture, da melhor forma possível, todo deslocamento da esfera na região de interesse.

No início do processo, o programa é iniciado e ativa a *webcam* para captura de imagem em tempo real. Em seguida define-se a região de interesse para o deslocamento da esfera e toma-se uma imagem da proveta com o fluido em análise (imagem inicial) para calibração, como referência para a detecção de movimento. O próximo passo é lançar a esfera no centro do tubo.

Feito isso, o sistema interage com o programa. Num intervalo de aquisição de 0,1 s é realizada uma comparação da nova imagem com a imagem inicial baseado no valor das componentes do modelo de cor RGB, obtendo assim o movimento da esfera. Desta maneira, torna-se imediata a medida da viscosidade pelo método de Stokes. A Figura 08 ilustra o esquema montado para análise da viscosidade da glicerina.

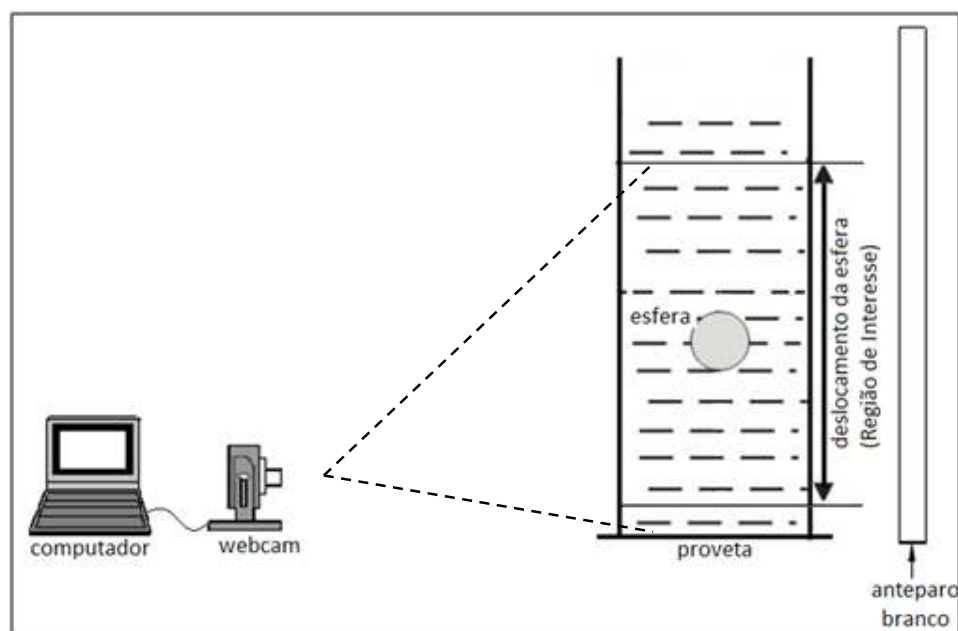


FIGURA 08: Esquema do cenário do sistema para determinação da viscosidade.
Fonte: O autor (2011)

Foram realizados ensaios em triplicata avaliando a relação diâmetro tubo/esfera na medida da viscosidade e o filtro do programa para o monitoramento da esfera. A variação de RD foi feita variando, apenas, o diâmetro do tubo. Para dar confiabilidade e reprodutibilidade aos resultados foram utilizadas técnicas estatísticas como desvio padrão, verificação de *outliers*, e análise da variância com aplicando o teste ANOVA.

4.4. PROGRAMA EM DELPHI®

Desenvolvido em ambiente Core Gear Rad Studio 2006 (Delphi 6) da Borland®, o programa computacional chamado “**Viscosímetro**”, é destinado à determinação da viscosidade. Este programa é bastante simples e amigável como pode ser visto na Figura 09.

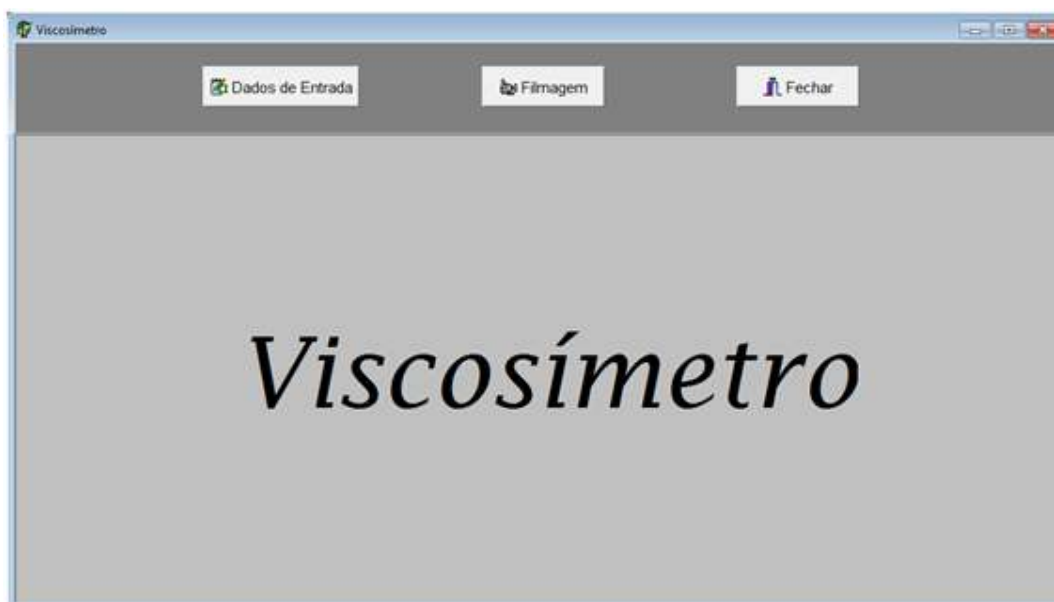


FIGURA 09 - Tela de abertura do programa “Viscosímetro”

Na tela de abertura do programa, exibida na Figura 09, o usuário primeiramente, aciona o botão “**Dados de Entrada**”. Abre-se então, uma janela apresentada na Figura 10, para entrada e cálculos dos dados da esfera (tipo, massa, diâmetro, densidade e volume), do fluido (nome, densidade e temperatura) e do tubo (diâmetro), dados esses que serão utilizados para o cálculo da viscosidade. Após fornecer os dados solicitados, estes são salvos em arquivo .txt.

The image shows a software window titled "Viscosímetro". At the top, there are three buttons: "Dados de Entrada", "Filmagem", and "Fechar". Below these, the main area is titled "Dados de Entrada". It contains three groups of input fields:

- Dados da Esfera:** Material, Massa [g], Diâmetro [cm], Volume [cm³], and Densidade [g/cm³].
- Dados do Fluido:** Nome, Densidade [g/cm³], and Temperatura [°C].
- Dados do Tubo:** Diâmetro [cm].

At the bottom right of the input area, there are two buttons: "Limpar" (with a trash icon) and "Salvar" (with a checkmark icon).

FIGURA 10 - Tela do programa “Dados de Entrada”

O próximo passo é acionar o botão “Filmagem & Análise”. Abrir-se-á uma janela, como apresentada na Figura 11, responsável pela filmagem, análise e exibição os resultados de forma gráfica.

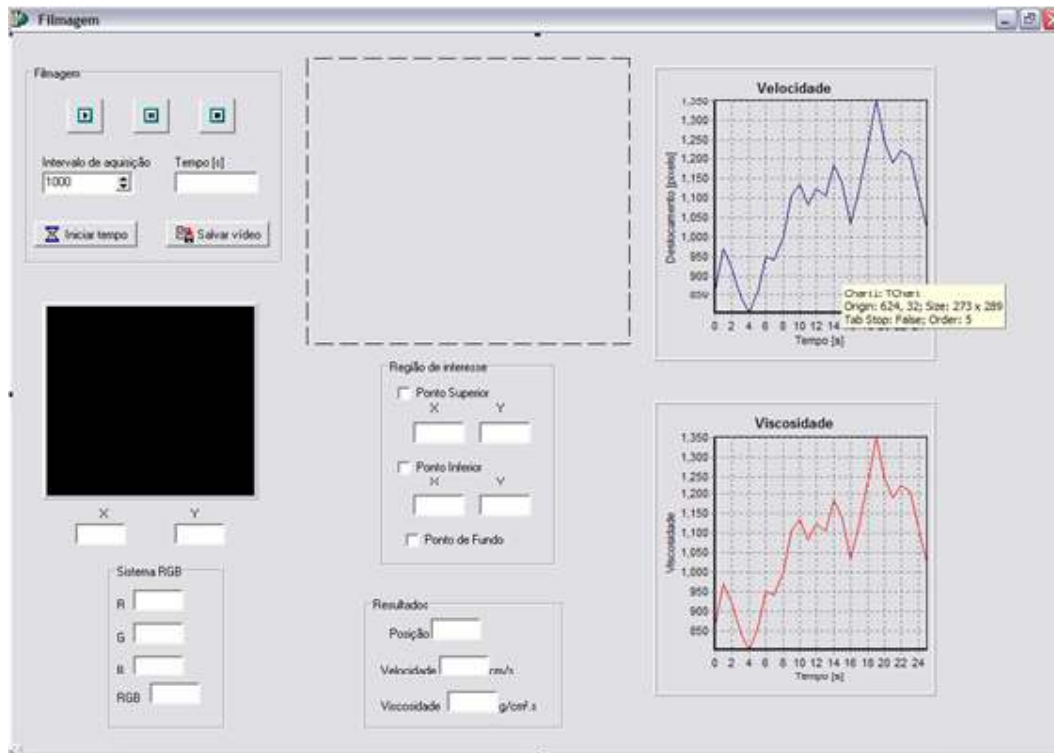




FIGURA 11 - Tela do programa “Filmagem & Análise”

O programa reconhece rapidamente a *webcam* instalada e o usuário dá início à captura das imagens ao clicar no botão , imediatamente será exibido o cenário de interesse no quadro negro (imagem real) e quadro tracejado (imagem processada). Em seguida, define-se as coordenadas da Região de Interesse (ponto superior e ponto inferior), selecionando cada ponto com o uso do mouse, e delimitando a região no quadro tracejado, respectivamente. O mesmo procedimento deve ser feito para escolha do ponto de fundo.

Feito isso, a cada instante, predeterminado pelo intervalo de aquisição escolhido, o programa registra uma nova imagem, ou seja, realiza o monitoramento da esfera dentro da região pré-estabelecida. O monitoramento também pode ser visto por gráficos, Velocidade da Esfera VS. Tempo e Viscosidade do fluido VS. Tempo, exibidos na mesma tela “**Filmagem & Análise**”, como mostra a Figura 11. Ao término da análise a captura de imagens é encerrada pelo acionamento do botão .

Um fluxograma geral da estrutura de programação implementada para o monitoramento da esfera está apresentada na Figura 12. Observa-se que a rotina “Programa” é responsável pelo gerenciamento global do programa. Com acesso pelo “ícone”, a rotina principal carrega inicialmente todas as configurações gerais para o programa por meio do “Arquivo de configuração”. Estas configurações são estabelecidas no ambiente visual da “Janela do programa”. A aquisição de dados é iniciada a partir das “Entradas pelo usuário”, pelos diversos botões e comandos em tela. Ao ser iniciado, o “tempo” é disparado para realizar um *loop* em intervalo de tempo estabelecido. A informação de saída do *loop* é a posição e velocidade da esfera no viscosímetro e a viscosidade do fluido detectado pela rotina de processamento de imagem. O acesso aos dados da imagem capturada é feito através de uma rotina de comunicação (*driver*) com a *webcam*. Todos os valores de *loop* são disponibilizados na rotina do programa que grava as informações num “arquivo de saída” e também atualiza as informações da janela do programa, disponibilizando-as para visualização gráfica.

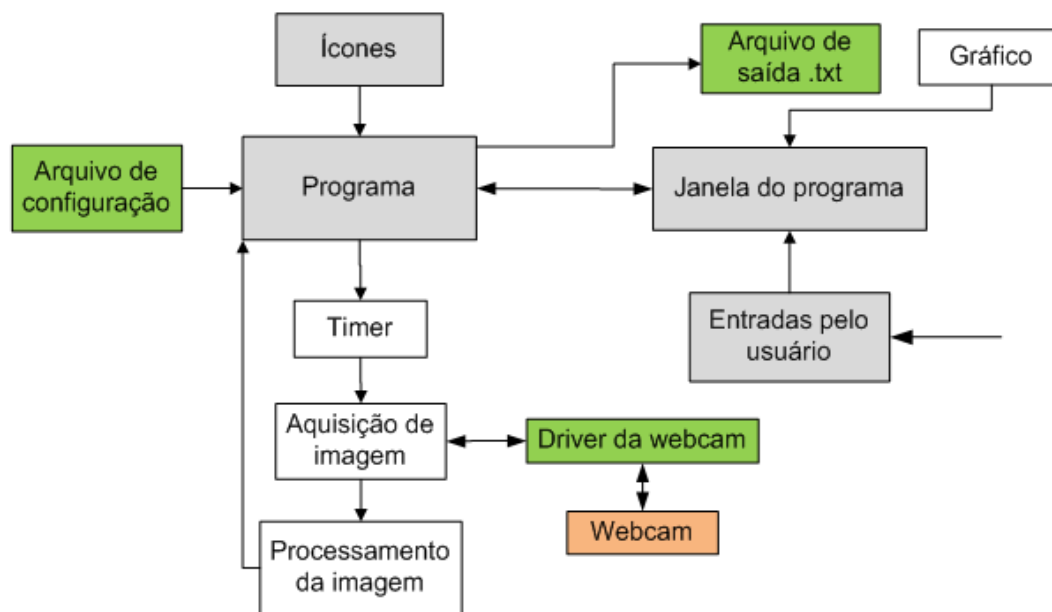


FIGURA 12 - Fluxograma da estrutura do programa desenvolvido para aquisição de imagem e determinação da viscosidade

4.5. RESULTADOS

Conforme apresentado na seção anterior, foi desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de medir a viscosidade de fluidos newtonianos por meio do processamento de imagens digitais baseado no modelo RGB de cores, utilizando uma simples *webcam* para capturar a imagem. Os ensaios foram baseados no método de Stokes. Fluido em análise, glicerina bidestilada USP a uma temperatura de $24 \pm 1^\circ \text{C}$.

A validação do sistema envolveu duas etapas: na primeira foram realizados ensaios a fim de saber a relação (RD) adequada entre os diâmetros do tubo (D_t) e esfera (D_e) na determinação da viscosidade. Na segunda etapa, fundamentada nos resultados da primeira etapa, foi avaliada o filtro do programa computacional na medida da viscosidade. Ainda para comprovar eficiência ao método, foi feita análise da viscosidade da glicerina com um viscosímetro rotacional da marca Brookfield (Modelo RVDV-I+) com a haste n.º 3, a 50 RPM, 47% de torque, obtendo resultado de $9,12 \pm 0,01 \text{ g/cm.s}$ a 24°C .

4.5.1. Viscosidade Sob a Influência de Rd

Na Tabela 01 encontram-se os valores da viscosidade para variações na razão entre diâmetro do tubo e esfera. Neste ensaio, o diâmetro da esfera (D_e) de vidro permaneceu constante, variando apenas o diâmetro do tubo (D_t). O filtro do programa utilizado foi de 50%.

TABELA 01 - RESULTADO DA VISCOSIDADE MÉDIA DA GLICERINA BIDESTILADA SOB INFLUÊNCIA DE RD À TEMPERATURA DE 24 ± 1 °C

| Diâmetro do tubo | D_{t1} [cm] | D_{t2} [cm] | D_{t3} [cm] |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | $3,366 \pm 0,003$ | $4,437 \pm 0,003$ | $6,155 \pm 0,005$ |
| Diâmetro da esfera [cm] | $2,07 \pm 0,01$ | | |
| RD (D_t/D_e) | 1,63 | 2,14 | 2,97 |
| Viscosidade da Glicerina [g/cm.s] | | | |
| | $17,0 \pm 0,8$ | $9,6 \pm 0,1$ | $7,5 \pm 0,3$ |

A representação gráfica da Figura. 13 permite evidenciar as grandes variações na viscosidade da glicerina ocorridas devido alterações de RD.

Viscosidade da Glicerina ($T = 24 \pm 1$ °C)

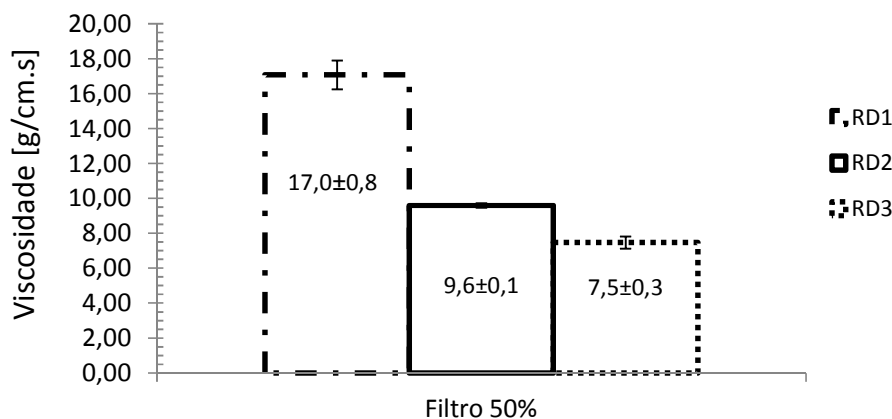


FIGURA 13 – Gráfico do resultado da viscosidade da glicerina avaliando a influência da razão D_t/D_e na medida

Tal influência ocorre devido a presença das paredes do tubo. Porém, também se percebe, que a viscosidade referente ao ensaio RD2 ($9,6 \pm 0,1$ g/cm.s) obteve um resultado próximo ao resultado do viscosímetro rotacional ($9,12$ g/cm.s) com o menor desvio padrão ($\delta = 0,1$). Desta forma, o ensaio RD2 apresenta a razão mais adequada para atender a faixa da viscosidade da glicerina. Além de já demonstrar a possibilidade de utilizar a análise de imagem para tal determinação.

4.5.2. Viscosidade Sob a Influência do Filtro do Programa

Após avaliação dos resultados da primeira se faz necessária uma avaliação sobre o filtro do programa utilizado na análise. Na Figura 14 é apresentado o gráfico do resultado da viscosidade da glicerina variando o filtro do programa computacional. É possível notar que o melhor resultado foi obtido ao utilizar o filtro de 35% com viscosidade da glicerina de $9,3 \pm 0,1$ g/ cm.s, valor mais próximo do viscosímetro rotacional. Visto que, ao usar outros valores para filtro (25% e 50%) ocorreram consideráveis oscilações na medida da viscosidade, provavelmente, devido a atrasos no monitoramento da esfera e/ou a interferência da luminosidade do ambiente.

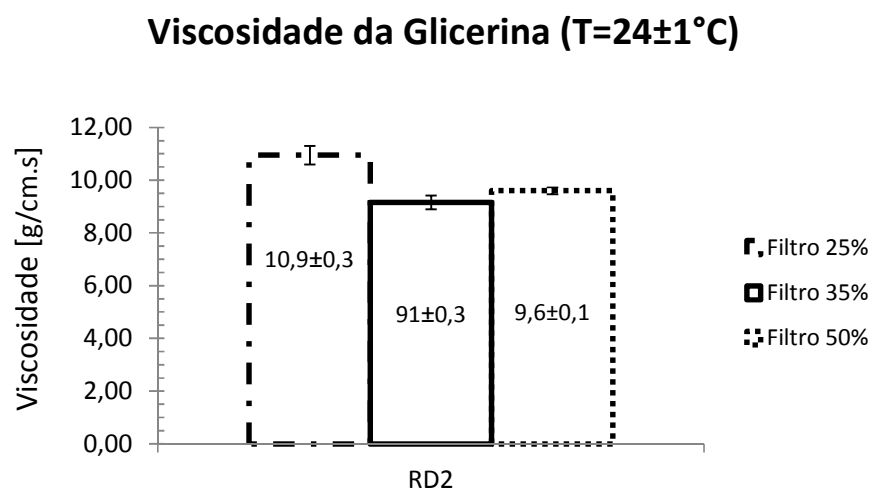


FIGURA 14 – Gráfico do resultado da viscosidade da glicerina avaliando a influência do filtro do programa

A aplicação da técnica de análise de imagem para determinação da viscosidade da glicerina mostrou eficácia, sendo o ensaio do RD2 e filtro do programa de 35%, o melhor resultado para validação. Cabe ressaltar a importância da razão entre o diâmetro do tubo e da esfera (RD) no método de Stokes.

5. CONTROLE DE NÍVEL

O nível é uma variável importante na indústria. Haja vista que em ambientes industriais a medida do nível de líquido deve ser mantida nos patamares desejados para o sucesso da produção.

A medida do nível de líquido em um reservatório é efetuada a fim de manter o nível de líquido em um valor fixo ou entre dois valores determinados, ou ainda para determinar a quantidade (volume ou massa) do fluido em questão (CAMPOS & TEIXEIRA, 2006). Um Sensor de nível envia um sinal para o controlador, que compara com o valor ótimo (*set-point*), e conforme a diferença entre os dois valores, o controlador envia um sinal para acionar a válvula.

Os sistemas de medição de nível variam em complexidade desde simples visores para leituras locais até indicação remota, registro ou controle automático. Porém, em algumas aplicações, não é possível instalar dispositivos de medição mecânica. Por esta razão, os métodos não-invasivos, que não incluem as ligações elétricas dentro de tanques têm sido de grande interesse nos últimos anos (WANG et. al., 2009; RAUTENBERG & HENNING, 2003; HAUPTMANN et. al., 2002).

Além disso, alguns processos necessitam de um controle preciso do nível de líquidos. Dessa forma, um controle automático pode otimizar a produção, diminuir os riscos de erro de dosagem além de afastar trabalhadores de ambiente muitas vezes insalubres, como em processos que envolvam ácidos e substâncias tóxicas.

Em virtude dos fatos mencionados, a aplicação do controle do nível de líquido em tanques por meio da análise de imagem justifica a realização desse estudo. Para isso foi desenvolvido um programa que coordena a aquisição de imagem, faz a calibração da imagem adquirida pela câmera e controla a tomada de decisão da válvula solenóide que faz o controle *on-off* (liga-desliga),

fazendo com que o sistema seja automatizado na medição do nível de líquido e no seu controle.

5.1. CONTROLE DE PROCESSO

Um sistema de controle de um dado processo tem a responsabilidade de monitorar as variáveis de saída, fazer decisões sobre como melhor manipular as variáveis de entrada (do tipo manipuladas) para obter o comportamento de saída desejado, pela instrumentação, sensores e atuadores que fazem com que o sistema tenha acesso às informações do processo, bem como atuar sobre o mesmo e efetivamente implementar tais decisões no processo (SERBOG et al 2003). Uma representação esquemática de um sistema de controle é disposta na Fig. (15).

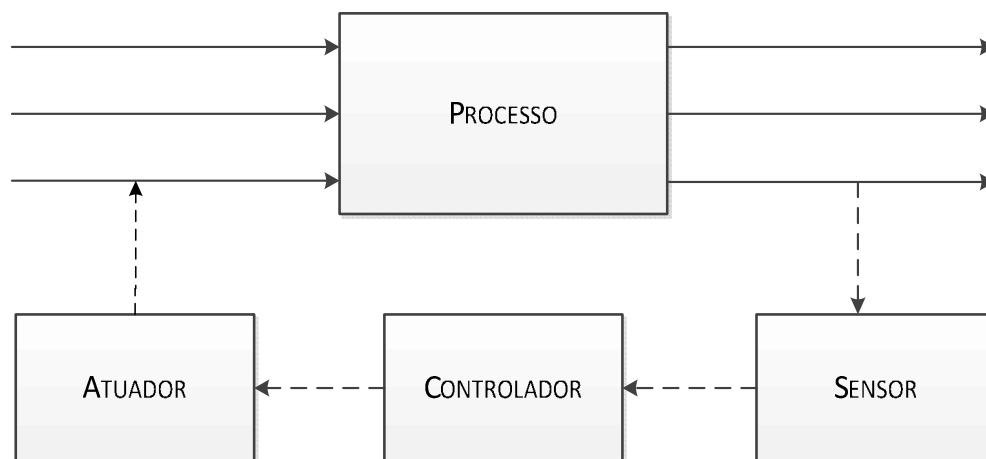


FIGURA 15: Representação esquemática simplificada de um sistema de controle de processo. FONTE: O autor (2011)

Quando tais tarefas são realizadas por um operador, tem-se um sistema de controle manual. No entanto, quando o atuador humano é substituído por um controlador automático, o controle se torna automático, ou seja, um sistema de controle de malha fechada (ALVES, 2005; OGATA, 1997).

No caso do sistema de controle automático, o mesmo é constituído pelos seguintes elementos:

Sensores: São dispositivos usados para adquirir informações das variáveis do processo, principalmente das variáveis de saída. Na maioria das aplicações de controle de processos os sensores são para medir temperatura (termopares e termorresistências), pressão (transdutores de pressão), vazão (fluxímetro, rotâmetros), composição (cromatografia, espectrofotometria, densimetria) entre outros.

Controladores: São responsáveis pela tomada de decisão para manter a variável em seu valor desejado (*set-point*). São geralmente equipamentos eletrônicos com rotinas de decisão implementadas. Podem ser computadores ou equipamentos similares com capacidade de processamento.

Atuadores: São dispositivos que, quando acionados, executam uma ação física, definida pelo sistema controlador por meio de uma ação de controle. Podem ser magnéticos, hidráulicos, pneumáticos, elétricos ou de acionamento misto.

Elementos finais de controle: Dispositivos com a tarefa de implementar no processo o comando de mudança enviado pelo controlador. Podem ser válvulas de controle, relés, bombas, ventiladores, resistências elétricas, alarmes, etc.

Existem diversas técnicas que podem ser usadas em controle de processos, conforme apresentada na literatura da área (ALVES, 2005; SEBORG, 2003; CARVALHO, 2000; SMITH & CORRIPIO, 1985). Convém ressaltar que a escolha da técnica depende de diversos fatores, como a existência e complexidade de um modelo matemático, disponibilidade de equipamentos e dispositivos de instrumentação, precisão necessária, escolha adequada das variáveis controlada e manipulada, e também identificação de distúrbios.

Neste trabalho foi utilizado o controle on-off para validação do controle de nível de líquido em tanques pela técnica de análise de imagem com uma webcam como sensor, por ser simples barato e eficiente.

5.1.1. Controle *On-off*

Neste sistema de controle, o elemento atuador apresenta apenas duas posições fixas, geralmente “ligado ou desligado” ou “aberto e fechado”, por isso é também chamado de controlador *on-off* (SERBOG, et. al. 2003). Neste tipo de ação o controlador é modelado por um relé conforme mostra a Figura 16.

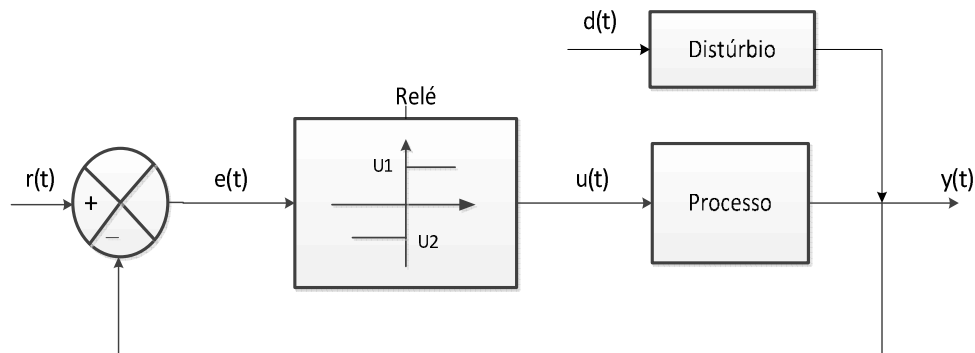


FIGURA 16: Ilustrativo do Relé do Controle on-off. FONTE: O autor (2011)

O sinal de controle $u(t)$ pode permanecer igual a um valor máximo ou a um valor mínimo, conforme o sinal de erro atuante $e(t)$ que seja positivo ou negativo, como podem ser visto na Equação 13

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{se } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Onde U_1 e U_2 são constantes.

Os controladores *on-off* são normalmente dispositivos elétricos, sendo que as válvulas operadas por solenóides elétricas são extensivamente usadas nestes controladores (OGATA, 2000).

Sua ação de controle pode ser considerada a ação de controle mais simples e mais econômica. Este tipo de ação possui limitações no que diz respeito ao comportamento ativo e em regime permanente do sistema em

malha fechada. Suas aplicações restringem-se a sistemas onde não é necessário precisão nem bom desempenho ativo.

5.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para implantar o sistema de análise da imagem digital proposto para o controle do nível de líquido foi utilizado um conjunto de componentes listados abaixo e apresentados na Figura 17.

- Um tanque reservatório de água com capacidade de 20 L;
- Uma câmera do vídeo do tipo *webcam* Clone® (10028) de 5 megapixels para detecção da imagem do nível de líquido;
- Uma placa de aquisição de dados eletrônica de baixo custo fabricado pela Measurements Computing, modelo PMD-1208LS, possui canais analógicos e digitais de entrada e saída para comando de sinal ao processo;
- Uma válvula solenóide de 110-120 volts com corrente alternada, utilizada como elemento final de controle de nível;
- Um relé de estado sólido que permite o acionamento da válvula a partir do sinal de comando da placa eletrônica;
- Um computador para aquisição dos dados de análise e controle do processo.

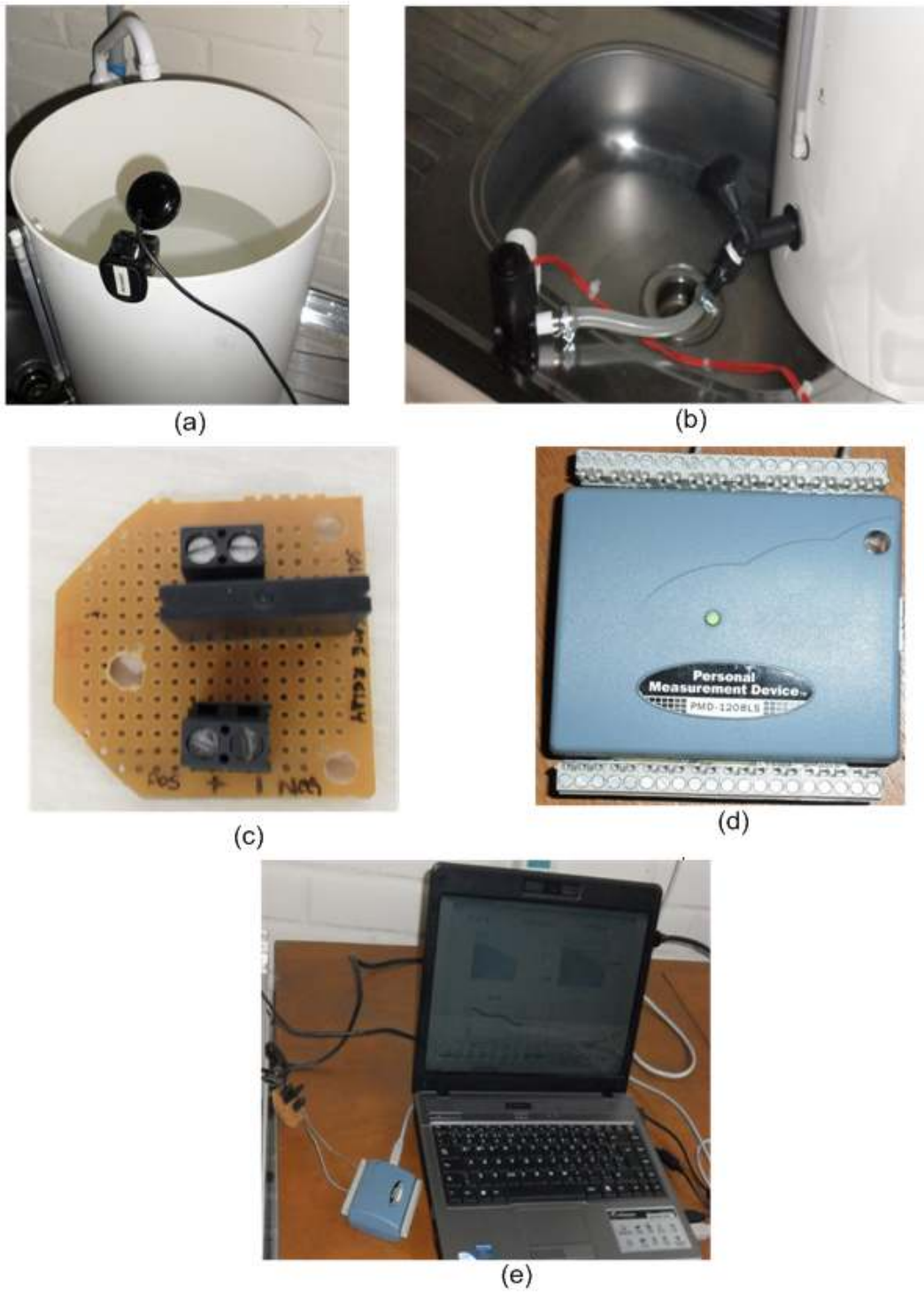


FIGURA 17 – Materiais e equipamentos utilizados nos ensaios de controle nível. (a) Vista superior do tanque e localização da *webcam* para capturar as imagens; (b) Válvula solenóide e conexões; (c) Relé; (d) Placa de aquisição de dados; (e) Notebook. FONTE: O autor (2011)

Os experimentos para validação do sistema foram realizados no LESF (Laboratório de Engenharia de Sistemas Fracionários) do PPGEQ/UFPR e no Laboratório de Pesquisa Experimental do PPGEQ.

5.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Na Figura 18, é possível observar um esquema da unidade experimental utilizada, incluindo as partes propostas neste estudo relativas ao monitoramento e controle do nível da superfície da água. Para monitorar o nível de água no reservatório (1), foi desenvolvido um sensor baseado na detecção de movimento (comparação simples) da imagem por uma *webcam* (2), com o processamento da imagem por um programa computacional (3). Tal programa, permite ao usuário a escolha dos limites superior e inferior e o *set-point* do nível de líquido. Para controlar o nível da superfície da água, foi implementado um controle *on-off*, cuja decisão e ação de controle foram admitidas via rotina computacional (3), em que é possível delimitar em tempo real, os limites inferior e superior (Região de Interesse da imagem) do nível de líquido e o valor de nível desejado (*set-point*). A placa de aquisição eletrônica (4) envia o sinal de comando para o relé (5) que permite a ação de controle para manipular a vazão de saída de água através de uma válvula solenóide (6).

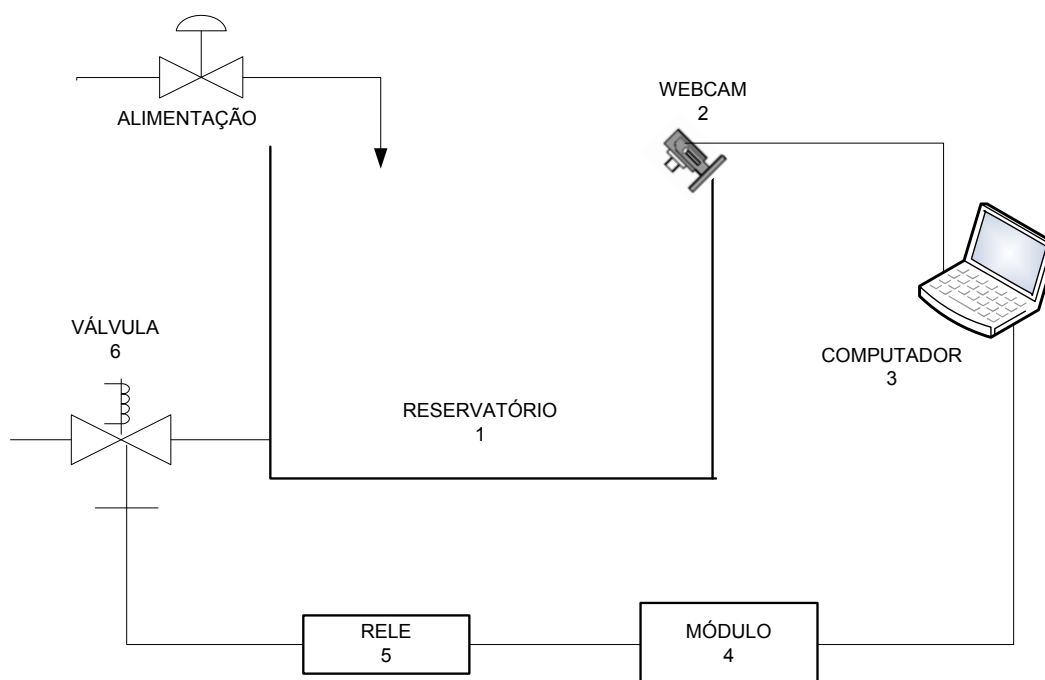


FIGURA 18 - Esquema do cenário do sistema para controle de nível de líquido. Fonte: O autor (2011)

Foram realizados ensaios em duplicata com uma baixa vazão na alimentação do tanque e o filtro utilizado para o processamento da imagem foi de 35%. Este valor de filtro foi escolhido baseado nos resultados da análise da viscosidade. A fim de garantir confiabilidade e reprodutibilidade aos resultados foram utilizadas técnicas estatísticas como desvio padrão.

5.4. PROGRAMA EM DELPHI

A implementação do sistema para aquisição das imagens e controle do nível de líquido foi desenvolvida em ambiente Core Gear Rad Studio 2006 (Delphi 6) da Borland®, o programa computacional chamado “Controle de Nível”, como o nome já diz é destinado ao controle do nível de líquidos.

De acordo com a janela do programa “**Controle de Nível**” apresentada na Figura 19, nota-se que o programa foi implementado com recursos visuais objetivando uma maior facilidade de uso.

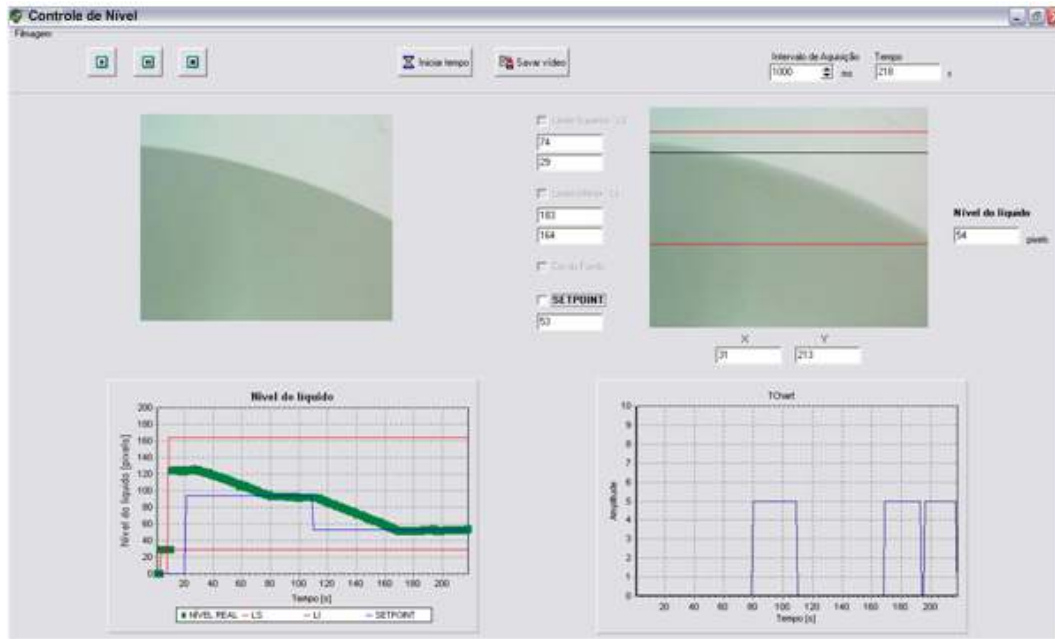




FIGURA 19 - Tela do programa “Controle de Nível”

O programa é capaz de reconhecer rapidamente a *webcam* instalada e o usuário pode dar início a filmagem ao clicar no botão , imediatamente será exibido dois quadros de imagem, imagem real (quadro esquerdo) e imagem processada (quadro direito). No quadro da imagem processada, escolhe-se com o auxílio do *mouse* o limite máximo e mínimo (linhas vermelhas) referente a região de interesse para o nível de líquido no tanque e o *set-point* ao clicar na imagem sobre o ponto desejado. A linha de cor preta representa o nível de líquido em tempo real. O limite máximo e mínimo e o *set-point* podem ser modificados, em caso de mudança no valor das variáveis. Na região de interesse são registrados os dados de cores para realizar a comparação entre as imagens a cada 1 s. O monitoramento do nível da superfície de líquido também pode visualizar graficamente. O gráfico Nível do Líquido VS Tempo (gráfico esquerdo) em que é possível ver o nível de líquido real e no gráfico

Amplitude VS Tempo comprava o controle *on-off* sendo aplicado. Ao término da análise a captura de imagens é encerrada pelo acionamento do botão .

Um fluxograma geral da estrutura de programação implementada para aquisição de dados e controle está apresentada na Figura 20. Observa-se que a rotina “Programa” é responsável pelo gerenciamento global do programa. Com acesso pelo ícone, a rotina principal carrega inicialmente todas as configurações gerais para o programa por meio do “Arquivo de configuração”. Estas configurações são estabelecidas no ambiente visual da “Janela do programa”. A aquisição de dados e o controle do processo são iniciados a partir das “Entradas pelo usuário”, pelos diversos botões e comandos em tela. Ao ser iniciado, o “tempo” é disparado para realizar um *loop* em intervalo de tempo estabelecido. A informação de saída do *loop* de controle é retornada para rotina principal que estabelece uma ação para a válvula através de uma rotina de comunicação (*driver*) com a placa de aquisição de sinal analógico/digital. A informação de saída do *loop* é o nível de líquido no tanque detectado pela rotina de processamento de imagem. O acesso aos dados da imagem capturada é feito através de uma rotina de comunicação (*driver*) com a *webcam*. Todos os valores de *loop* são disponibilizados na rotina do programa que grava as informações num “arquivo de saída” e também atualiza as informações da janela do programa, disponibilizando-as para visualização gráfica.

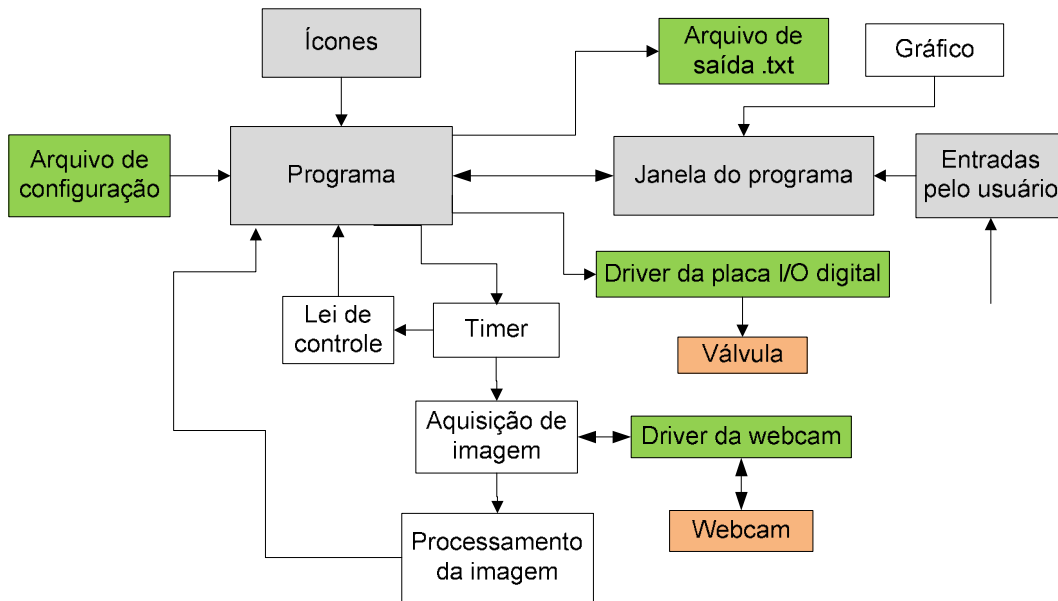


FIGURA 20 – Fluxograma da estrutura do programa desenvolvido para aquisição de imagem e controle do nível de líquido

5.5. RESULTADOS

Como visto na seção anterior, foi desenvolvido um programa capaz de monitorar o nível de líquido em tanques pelo processamento de imagens embasado no modelo RGB de cores, e de controlar a tomada de decisão da válvula de controle utilizando uma *webcam* como sensor, fazendo com que o sistema de controle de nível seja automatizado. Os resultados apresentados a seguir mostram o monitoramento do nível da água em um tanque reservatório com controlador *on-off* para condição de comportamento regulatório e servo. O teste para validação do sistema de análise imagem foi operado com vazão baixa de aproximadamente $23,24 \text{ cm}^3/\text{s}$ na alimentação.

5.5.1. Monitoramento do nível para controlador com comportamento regulatório

A Figura 21 apresenta um gráfico com o resultado do monitoramento do nível de líquido e o controlador quanto ao comportamento regulatório. É possível notar que a água até o instante de 15 s permaneceu no mesmo nível nos dois ensaios. Isso se deve ao fato da entrada de água ter ocorrido após o instante 15 s. Observa-se também que o controlador foi capaz de estabilizar o nível no *set-point* em 85 s para o ensaio 1 e 90 s para o ensaio 2, com a ocorrência de um número maior de oscilações, porém pequenas, no valor do *set-point* (47,41%) do ensaio 1.

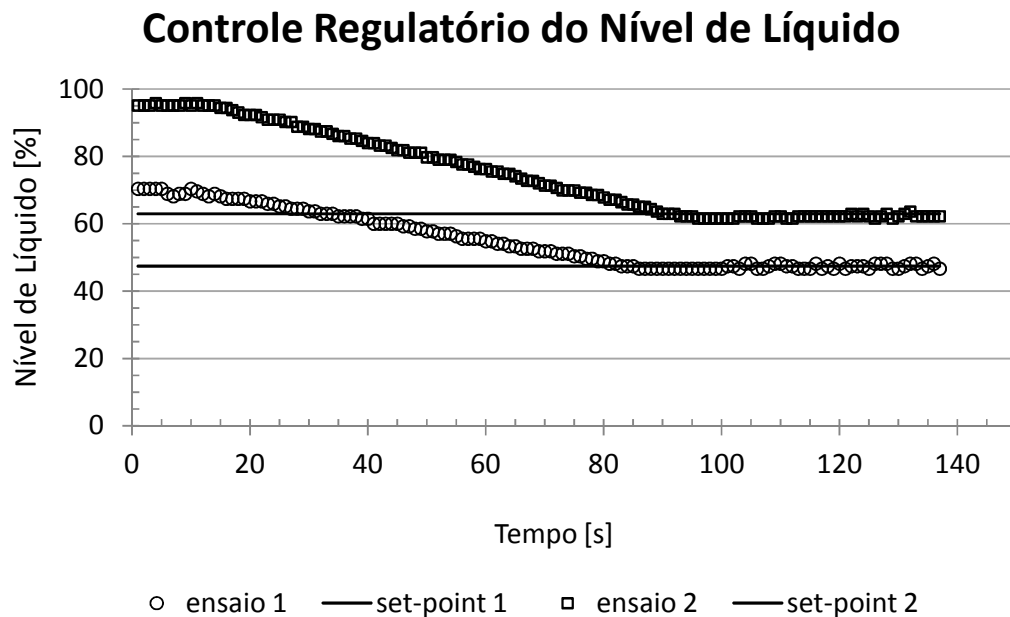


FIGURA 21 - Gráfico do monitoramento do nível de líquido. Uso de controlador *on-off* com comportamento regulatório.

No gráfico da Figura 22 é apresentado o monitoramento do nível de água do ensaio 1 na região do *set-point* (47,41%), para uma melhor visualização das oscilações nesse ponto. Nota-se que os pontos de oscilações

variam pouco em relação ao valor desejado (*set-point*) com desvio padrão da média para o nível de líquido de 0,08. Esses pontos podem ser considerados desprezíveis, visto que, pode-se trabalhar com uma região de segurança. Dessa forma, é possível verificar que o sistema apresentou desempenho satisfatório para condição de controle regulatório com processo operando a baixa vazão.

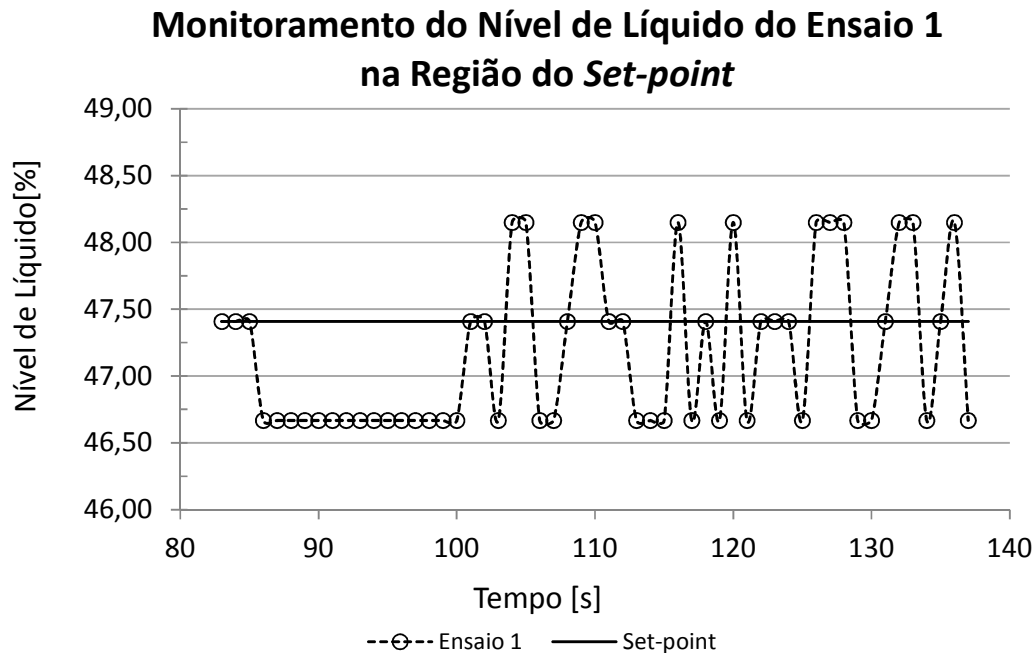


FIGURA 22 - Gráfico do monitoramento do nível de líquido do ensaio 1 na região do *set-point*.

O gráfico exibido na Figura 23 e 24 mostram o abrir-fechar da válvula no momento a partir do momento em que *set-point* é alcançado para o ensaio 1 e 2, respectivamente. Acredita-se que a justificativa, para o fato de um ensaio ter mais pontos de variações que outro, uma vez que, os dois ensaios foram realizados sob as mesmas condições (vazão de alimentação, filtro do programa), é a interferência da iluminação.

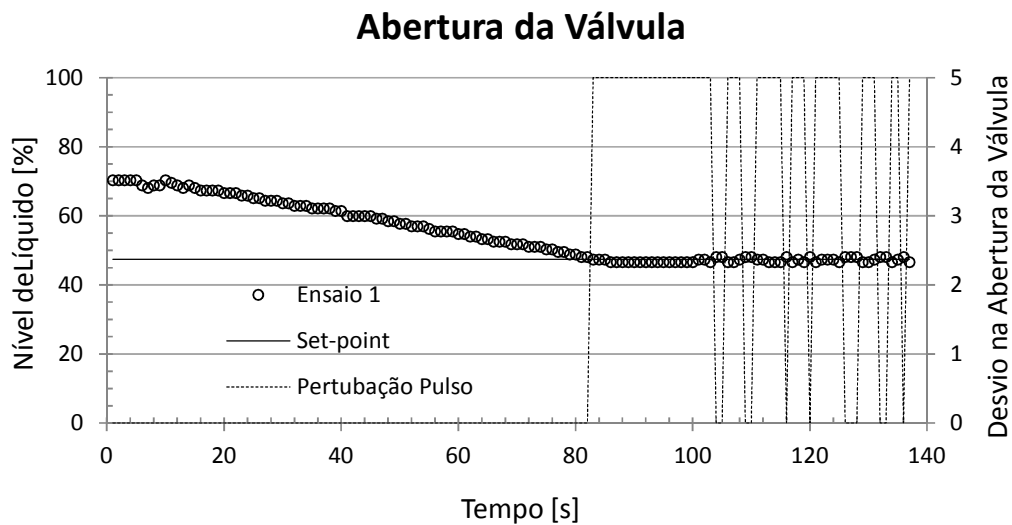


FIGURA 23 - Gráfico do monitoramento do nível de líquido do ensaio 1. Avaliação da abertura da válvula pelo controlador *on-off* com comportamento regulatório.

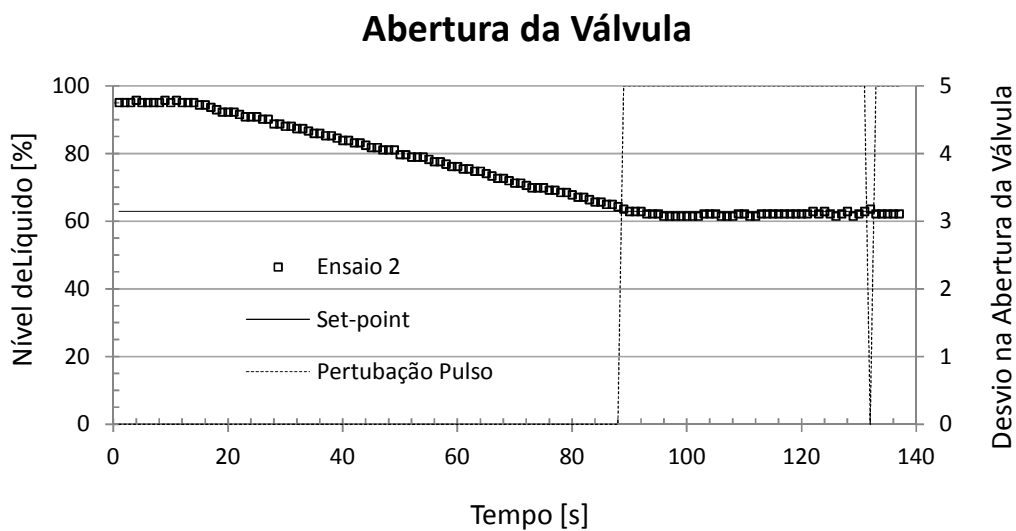


FIGURA 24 - Gráfico do monitoramento do nível de líquido do ensaio 2. Avaliação da abertura da válvula pelo controlador *on-off* com comportamento regulatório.

5.5.2. Monitoramento do nível para controlador com comportamento servo

A Figura 25 apresenta um gráfico com o resultado do monitoramento do nível de líquido com controlador *on-off* para comportamento servo. É possível observar que o nível da água até o instante de aproximadamente 20 s, permaneceu quase que constante no mesmo nível nos dois ensaios. Isso se deve ao fato da entrada de água ter ocorrido após o instante 20 s.

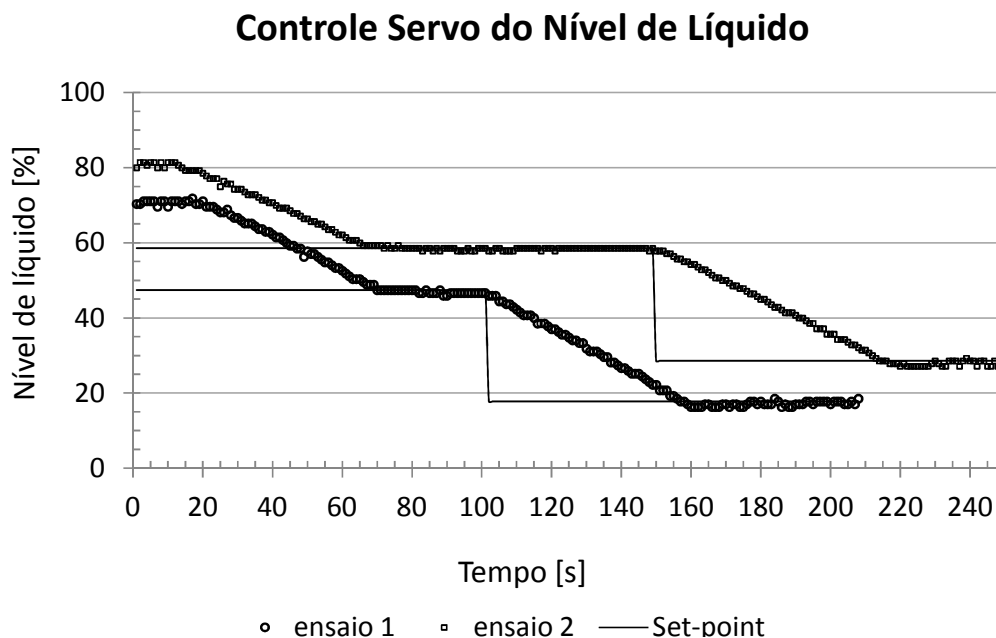


FIGURA 25 - Gráfico do monitoramento do nível de líquido. Uso de controlador *on-off* com comportamento servo.

Pode-se notar que o nível do líquido foi monitorado com eficácia com poucas e pequenas variações, consideradas insignificantes. Ainda no gráfico da Figura 25 são apresentados os resultados do controlador quanto ao comportamento servo – mudança no valor do *set-point*. No tempo de aproximadamente 100 s para o ensaio 1 e 150s para o ensaio 2, foi feita uma mudança de set-point, não apresentando oscilações significativas. O

controlador foi capaz de estabilizar o nível no novo *set-point* em 160 s para o ensaio 1 e 215 s para o ensaio 2. Com estes testes, verifica-se que o sistema foi capaz de fazer a mudança de *set-point* com eficácia.

O gráfico exibido na Figura 26 e 27 mostra o abrir-fechar da válvula no momento em que o *set-point* é alcançado para o ensaio 1 e 2, respectivamente. Na Figura (26) referente ao ensaio 1, observa-se a ocorrência de dois pontos de oscilação de comando nos instantes 155 s e 207 s, ambos durante o *set-point* (17,78%) com desvio padrão da média do monitoramento do nível durante o segundo *set-point* de 0,06. Os dois pontos possuem o mesmo valor de nível (18,52%), localizados muito próximos do valor de *set-point*. No ensaio 2 como mostra o gráfico da Figura 27, também apresenta pontos de oscilação nos dois trechos de *set-point* com desvio padrão da média para o valor do nível da água de 0,04 para o primeiro *set-point* e 0,1 para o segundo.

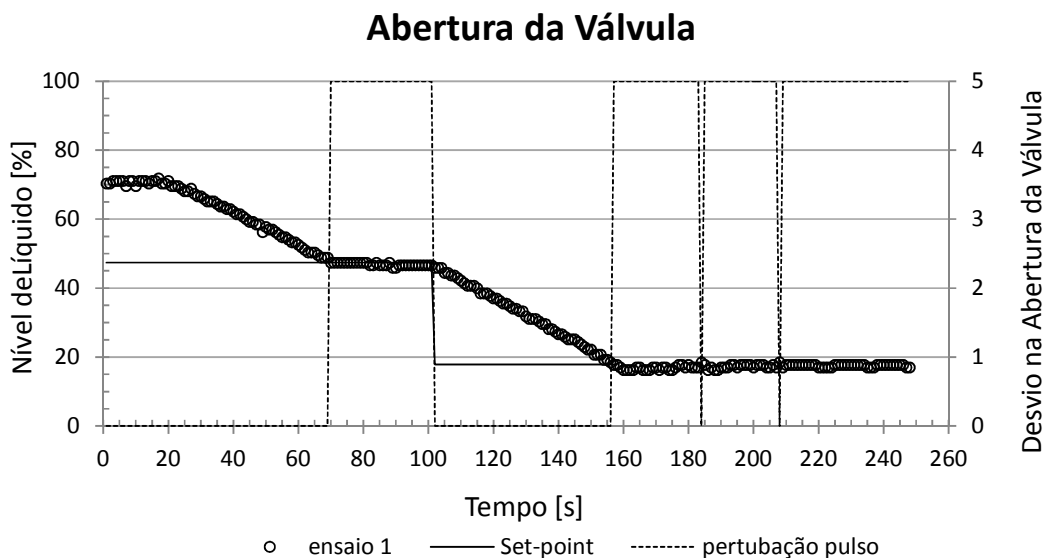


FIGURA 26 - Gráfico do monitoramento do nível de líquido do ensaio 1. Avaliação da abertura da válvula pelo controlador *on-off* com comportamento servo.

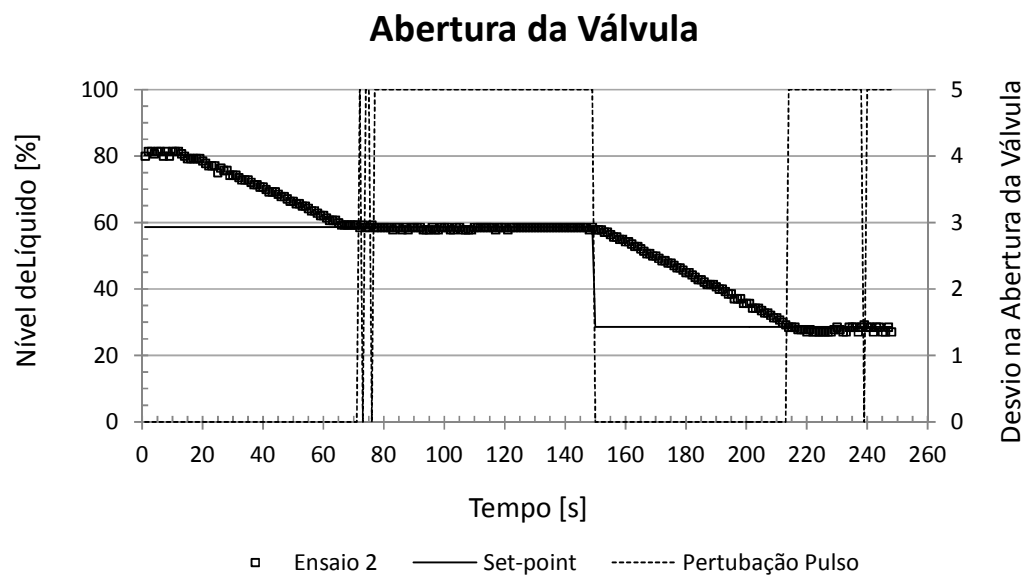


FIGURA 27: Gráfico do monitoramento do nível de líquido do ensaio 2. Avaliação da abertura da válvula pelo controlador on-off com comportamento servo.

6. EXPANSÃO DE POLIURETANAS

Os poliuretanos (PU) são usualmente sintetizados a partir da reação de poliadição de um isocianato, di ou polifuncional e um póliol (SERVES, 2007; GOMES, 2006;). Os poliuretanos diferem de outros polímeros, por não terem uma fórmula empírica que seja representativa de um todo. Porém, usualmente representa-se o poliuretano por suas unidades monoméricas principais. A Figura 28 apresenta a reação de síntese dos poliuretanos.

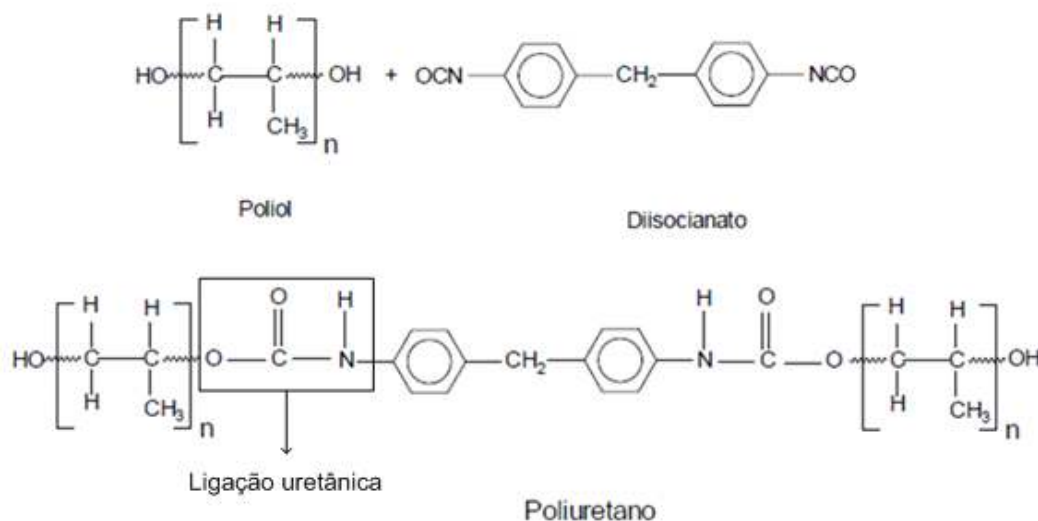


FIGURA 28 – Reação de síntese dos poliuretanos. FONTE: GOMES (2006)

As diferentes características químicas e físicas dos poliuretanos são obtidas pela adição de outros compostos químicos que atuam como agentes de expansão, catalisadores, agentes de ligação cruzada, agentes de extensão de cadeia, surfactantes, aditivos, entre outros (VILAR, 2002; WOODS, 1987). A escolha dos reagentes para a síntese dos poliuretanos, bem como, a proporção entre eles é responsável pelas diferentes propriedades físicas e químicas do produto final, que irão direcionar as aplicações do mesmo dentro do setor produtivo.

São várias as aplicações dos poliuretanos. Dentre elas, podemos destacar os elastômeros, as tintas ou adesivos e as espumas rígidas e flexíveis, que compõe a maior parte do mercado de PU. As espumas rígidas e flexíveis podem ser preparadas por dois processos: 1) Processo “*one-shot*” no qual todos os reagentes são misturados em uma única etapa de mistura (RIVERA-ARMENTA, et al 2004) e 2) O pré-polímero é preparado pela reação de isocianato orgânico com polióis apresentando um teor pré-determinado (estequiométrico) de –NCO livre (ALVES, 2006)

6.1. POLIOL

O termo “poliol” é abreviatura para alcoóis polifuncionais. São compostos que ao lado dos isocianatos são componentes essenciais para a formação dos poliuretanos (LUDWIG, 1996; OERTEL, 1993). As características mais importantes desta classe de compostos são a funcionalidade e a massa molar, as quais são utilizadas como referência para um dos métodos de classificação de PUs (SERVES, 2007). Os polióis reagem com o grupamento NCO do isocianato na síntese dos poliuretanos. Podem ser (a) polióis poliéteres, sintetizados pela polimerização dos óxidos de propileno, etileno e butileno; (b) polióis poliésteres, sintetizados pela reação de policondensação de um diácido em excesso de um diol e (c) polióis acrílicos, obtidos pela copolimerização de monômeros acrílicos convencionais (VILLAR, 2002).

Neste trabalho foi utilizado poliol poliéter, com estrutura apresentada na Figura 29, pela facilidade de obtenção e, por pelo fato de cerca de 90% (SERVES, 2007) dos polióis utilizados na fabricação dos poliuretanos são poliéteres. É utilizado em conjunto com isocianato para produzir espuma de poliuretano.

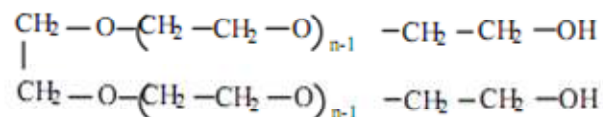


FIGURA 29 – Poliol poliéter. FONTE: ALVES (2010)

6.2. ISOCIANATO

A química envolvida na síntese de um PUs está baseada nas reações do grupo isocianato. O isocianato é um composto químico que possui em sua estrutura o grupamento NCO. Este grupo pode reagir com os polióis, formando poliuretanos; com aminas, formando poliuréias; com água, formando poliuréias e liberando CO₂, que por sua vez atua como agente de expansão e com grupos uretanos e uréia formando as ligações cruzadas alofanato e biureto, respectivamente (VILAR, 2002). Os isocianatos podem ser apresentados pela fórmula geral: R(N=C=O)_n. Em que, *R* pode ser um grupamento aromático, alifático ou cíclico; “n” = é a funcionalidade.

As principais reações que ocorrem entre o isocianato com poliol são exotérmicas e realizadas geralmente na presença de catalisadores.

Todos os isocianatos usados comercialmente possuem no mínimo dois grupos NCO por molécula, disponíveis para reação de polimerização e formação dos poliuretanos (SERVES, 2007; VILAR, 2002). Os isocianatos mais usados comercialmente são o MDI (difenilmetano diisocianato) e o TDI (tolueno diisocianato).

Neste trabalho, optou-se por utilizar o MDI puro apresentado na Figura 30, pela facilidade de obtenção e também porque não houve o interesse em produzir um tipo específico de PU. O MDI puro é um líquido marrom escuro mistura de MDI 4-4 difenilmetano com isômeros e homólogos de maior

funcionalidade. É utilizado em conjunto com polióis para produzir espuma rígida de poliuretano.

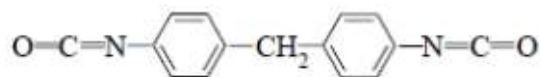


FIGURA 30 – Diisocinato de 4,4 difenilmetano (MDI). FONTE: VILAR, 2002

6.3. ETAPAS DE FORMAÇÃO DA ESPUMA DE POLIURETANO

A reação química entre um poliol e um isocianato ocorre espontaneamente quando eles são misturados. A polimerização, uma vez iniciada é exotérmica (SERVES, 2007).

Na Figura 31 apresentada as etapas da formação da espuma e uma descrição mais detalhada são exibidas na Tabela 02. Inicialmente, durante etapa de agitação, ocorre a mistura do ar, com os reagentes líquidos formando microbolhas, processo chamado de nucleação. Simultaneamente, a concentração do gás carbônico, aumenta no interior das microbolhas e a massa da espuma começa a expandir em volume. Após a saída do agente expensor por evaporação, é iniciado o processo de cura da espuma de poliuretano.

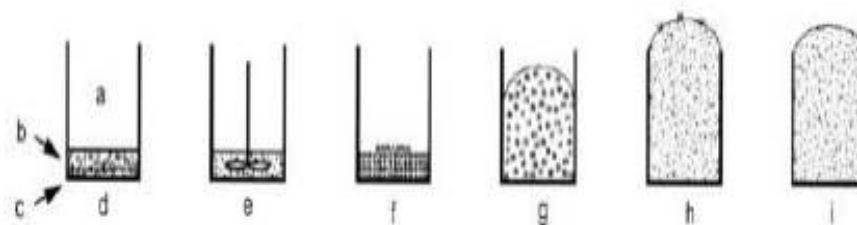


FIGURA 31 – Etapas da Formação da Espuma Convencional: A) Ar; B) Polioli, Água E Aditivos; C) Isocianato; D) Matérias-Primas; E) Mistura e Nucleação; F) Creme e Início Do Crescimento; G) Crescimento, H) Separação de Fase, Suspiro e Gelificação; I) Cura. FONTE: VILAR (2002)

TABELA 02 - DESCRIÇÃO DETALHADA DAS ETAPAS DE FORMAÇÃO DA ESPUMA

| Etapas | Mistura | Creme | Crescimento | Suspiro | Cura e pó cura |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|
| Tempo | 0 | 10 s | | | 60 s |
| Fenômenos Físicos | Dispersão das bolhas e reagentes | Mudança de cor | Aumento da viscosidade | Abertura da célula | Horas a dias |
| Fenômenos Cinéticos | Colisões das moléculas | Reação água + isocianato | | Reação poliál + isocianato e aumento da massa molar | |
| Morfologia | | Expansão das bolhas | Formação dos domínios rígidos | Precipitação da poliuréia | Aumento do suporte de carga |
| | | | | | Difusão |

FONTE: VILLAR (2002)

6.4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para monitorar a expansão da espuma de poliuretano por análise de imagem, juntamente com o acompanhamento da temperatura e peso durante sua formação foi necessário um conjunto de componentes, que se encontram listados abaixo.

- Um tubo de polietileno transparente com altura de 14 cm e diâmetro médio de $6,01 \pm 0,02$, como recipiente para formação da espuma;
- Reagentes: Isocianato MDI e Poliál poliéter, cujas análises de IR feitas com equipamento da Thermo Electron Corporation (Modelo Nicolet IR-100 FT-IR) são apresentadas no anexo 1 e apresentam absorvência em comprimentos de onda característicos dos componentes das moléculas: o poliál apresenta bandas de absorvência em 1100 cm^{-1} , indicando o grupamento -C-O-C- (éter) e o isocianato apresenta bandas de absorvência em 2350 cm^{-1} ,

indicando grupamento $-N=C=O$ (MDI). A formulação utilizada para produção da espuma é apresentada na Tabela 03;

- Dois termopares de ferro-constantan, junta exposta de 1/8". Inseridos transversalmente no tubo, sendo um localizado ao centro do tubo (3,0063 cm da parede do tubo) e o outro a uma distância de 1,5032 cm da parede do tubo, porém ambos na mesma altura. A Figura 32 mostra o posicionamento dos dois termopares no tubo.
- Balança analítica de precisão da marca Bioprecisa (FA-2104N);
- Duas câmera do vídeo do tipo *webcam* Clone® (10028) de 5 megapixels para capturar a imagem da superfície da espuma e a imagem do display da balança para registrar a perda de peso na formação da espuma;
- Uma placa de aquisição de dados eletrônica de baixo custo fabricado pela Measurements Computing, modelo PMD-1208LS, com canais analógicos e digitais de entrada e saída para comando de sinal ao processo, sendo a resolução de 12 bits;
- Um computador para aquisição dos dados de análise

Os experimentos para validação do sistema foram realizados no LESF (Laboratório de Engenharia de Sistemas Fracionários) do PPGEQ/UFPR e no Laboratório de Pesquisa Experimental do PPGEQ.

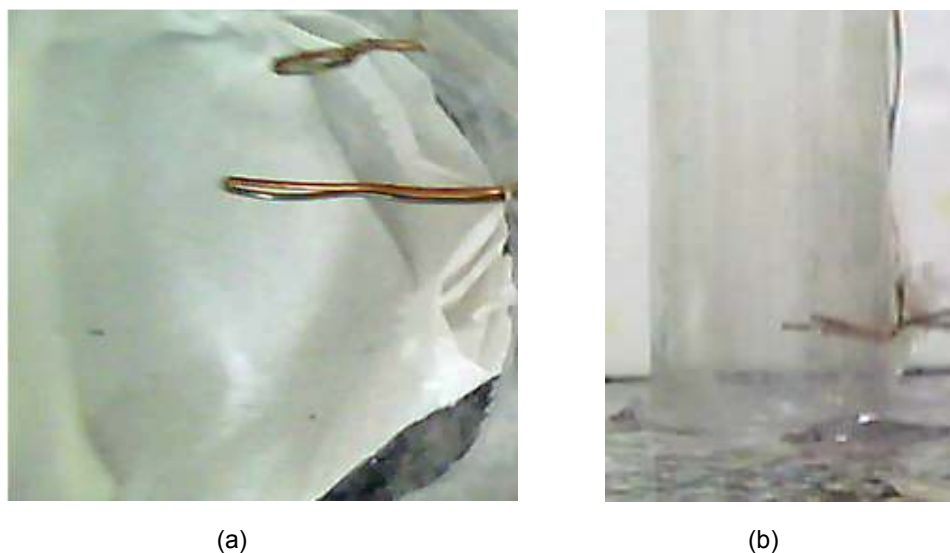


FIGURA 32 – Posicionamento dos dois termopares no tubo (a) Vista superior mostrando o posicionamento do termopar em relação ao centro do tubo; Vista lateral mostrando o posicionamento do termopar em relação à base da proveta.

TABELA 03 – FORMULAÇÃO DAS ESPUMAS

| Reagentes | Massa [g] | | | |
|-------------------|---------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | Ensaio altura/temperatura | | Ensaio altura/densidade | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Poliol | 7,002 | 12,503 | 11,921 | 12,584 |
| Isocianato | 14,128 | 25,235 | 24,147 | 24,046 |

Ressalta-se que os experimentos foram realizados em duplicata.

6.5. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Ao início do ensaio de formação de espumas de PUs, misturam-se os reagentes, e em seguida dá-se início ao monitoramento da expansão da espuma de poliuretano, por um sensor baseado na detecção da imagem por uma webcam, com o processamento da imagem por uma estratégia computacional. Simultaneamente, a isto, se realiza o registro da perda de peso

da espuma durante sua formação, também realizado pelo processamento da imagem através de uma segunda *webcam* para capturar a imagem do *display* da balança. Para o acompanhamento e registro da temperatura foi implementada uma rotina computacional para aquisição dos dados, valores da temperatura, fornecidos pelos termopares por meio de uma placa de aquisição.

6.6. PROGRAMA EM DELPHI

Um fluxograma geral da estrutura de programação implementada para aquisição de dados, monitoramento da altura e peso da espuma em expansão e registro de sua temperatura está apresentada nas Figura 33 e 34. Observa-se que em ambas, a rotina “Programa” é responsável pelo gerenciamento global do programa. Com acesso pelo ícone, a rotina principal carrega inicialmente todas as configurações gerais para o programa por meio do “Arquivo de configuração”. Estas configurações são estabelecidas no ambiente visual da “Janela do programa”. A aquisição de dados é iniciada a partir das “Entradas pelo usuário”, pelos diversos botões e comandos em tela. Ao ser iniciado, o “tempo” é disparado para realizar um *loop* em intervalo de tempo estabelecido. Na Figura 33 a leitura da temperatura por meio do termopar é retornada para rotina principal através de uma rotina de comunicação (*driver*) com a placa de aquisição de sinal analógico/digital. A informação de saída do *loop* na Figura 33 é a altura da superfície da espuma em expansão e na Figura 34 é a massa da espuma em expansão, além da altura da mesma, que são detectadas por rotina de processamento de imagem. O acesso aos dados da imagem capturada é feito através de uma rotina de comunicação (*driver*) com a *webcam*. Todos os valores de *loop* são disponibilizados na rotina do programa que grava as informações num “arquivo de saída” e também atualiza as informações da janela do programa, disponibilizando-as para visualização gráfica.

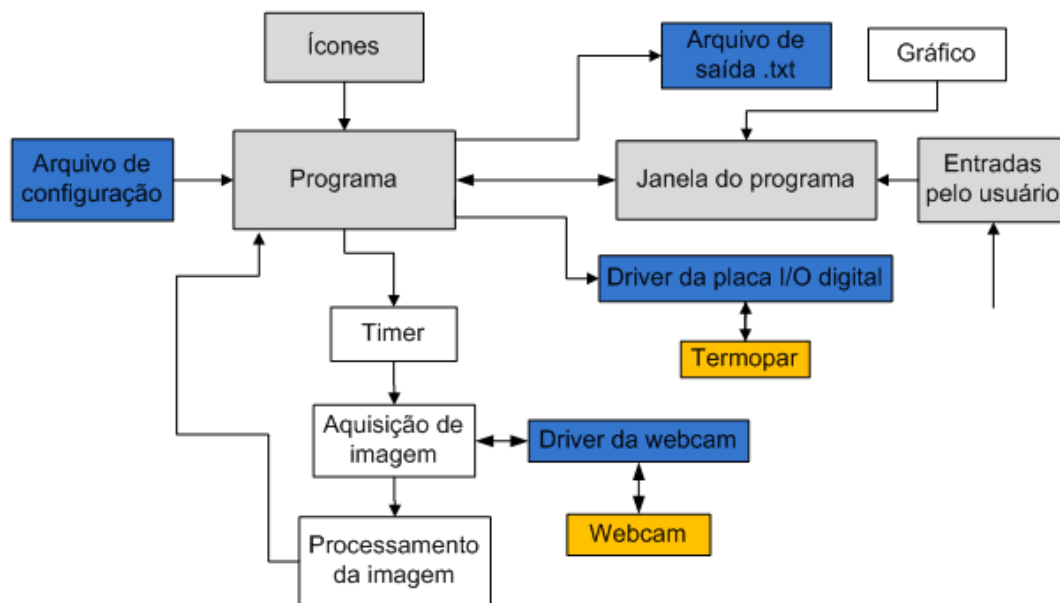


FIGURA 33 – Fluxograma da estrutura do programa desenvolvido para aquisição de imagem e monitoramento da expansão da espuma de PU e registro da temperatura. FONTE: O autor (2011)

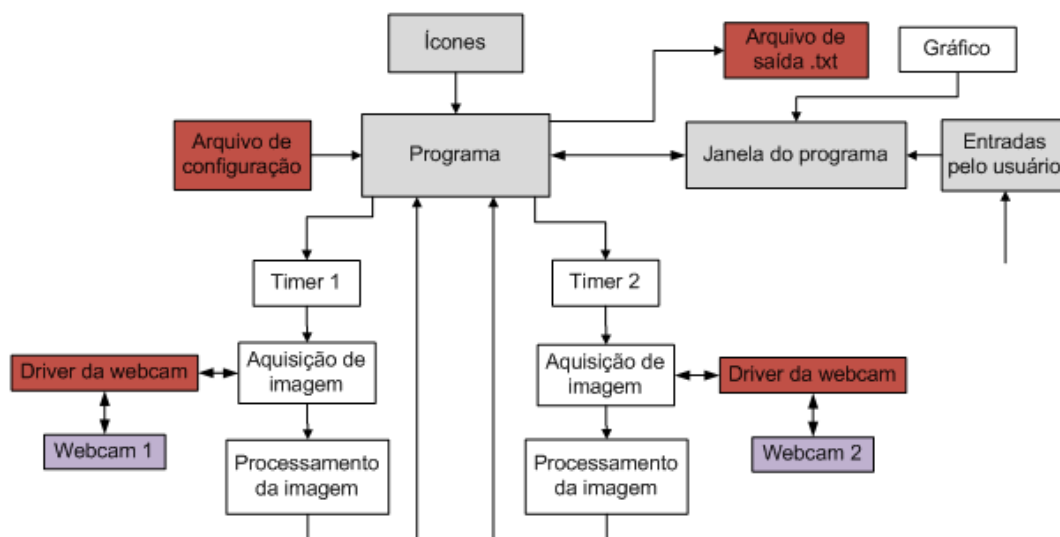


FIGURA 34 – Fluxograma da estrutura do programa desenvolvido para aquisição de imagem e monitoramento da expansão da espuma de PU e registro do peso da espuma. FONTE: O autor (2011)

6.7. RESULTADOS

Como visto na seção anterior, foi desenvolvido um programa de capaz de monitorar por análise de imagem o crescimento da espuma de poliuretano e a perda de peso da espuma, simultaneamente, e também, o registro da temperatura durante sua formação. A mistura dos reagentes foi realizada de forma manual por aproximadamente 20 s. Os resultados apresentados a seguir mostram os parâmetros avaliados para uma composição de reagentes (isocianato MDI e polioli poliéter) 2:1.

A Figura 35 mostra um ensaio de produção de espuma. As linhas de cor vermelha e azul delimitam a região de interesse – área em que o programa realiza o monitoramento da expansão (linha preta), baseado no modelo de cores RGB.

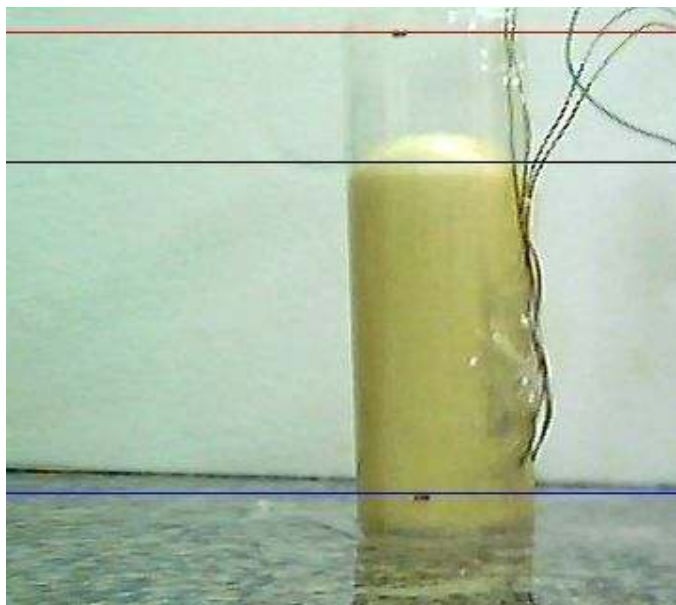


FIGURA 35 – Imagem do programa computacional no momento de monitoramento da expansão da espuma.

A expansão da espuma e seu aumento da temperatura durante a sua formação, medidos a partir do tempo de creme são mostrados na Figura 36. Nota-se que o crescimento da espuma é muito bem monitorado. O filtro do programa utilizado foi de 50%. É possível observar que a reação de polimerização é exotérmica. Nota-se também, que no ensaio 1 a reação de

formação da espuma é mais rápida comparada a reação do ensaio 2, fato relacionado a quantidade de reagentes utilizados. O ensaio 2 ocorreu com o dobro de massa dos reagentes, porém foi mantida a proporção 2:1. A temperatura apresentada no gráfico da Fig. 36 é a temperatura do centro do tubo, pois o segundo ponto de temperatura não apresentou variações significativas em relação ao ponto do centro do tubo.

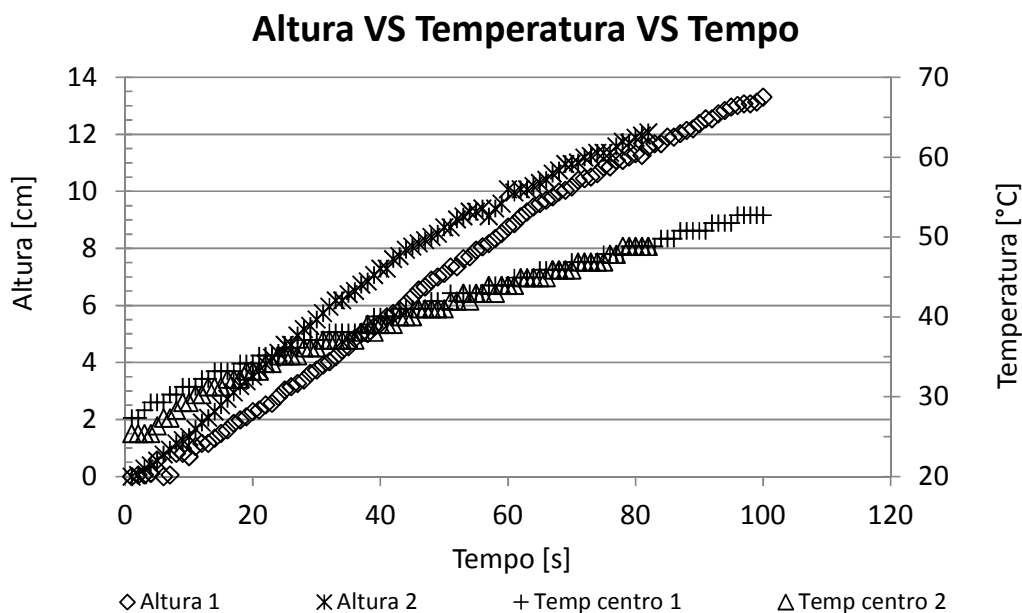


FIGURA 36 – Variação da altura e temperatura durante o processo de formação da espuma de PU.

A Figura 37 mostra o crescimento e a mudança na densidade da espuma com o tempo durante a formação de espuma, medidos a partir do tempo de creme, e baseados em dados de perda de peso e técnicas de análise de imagem. A diminuição na densidade está relacionada a perda de peso medido durante a ascensão da espuma, devido ao aumento na força de empuxo aplicada pelo crescente volume de ar deslocado.

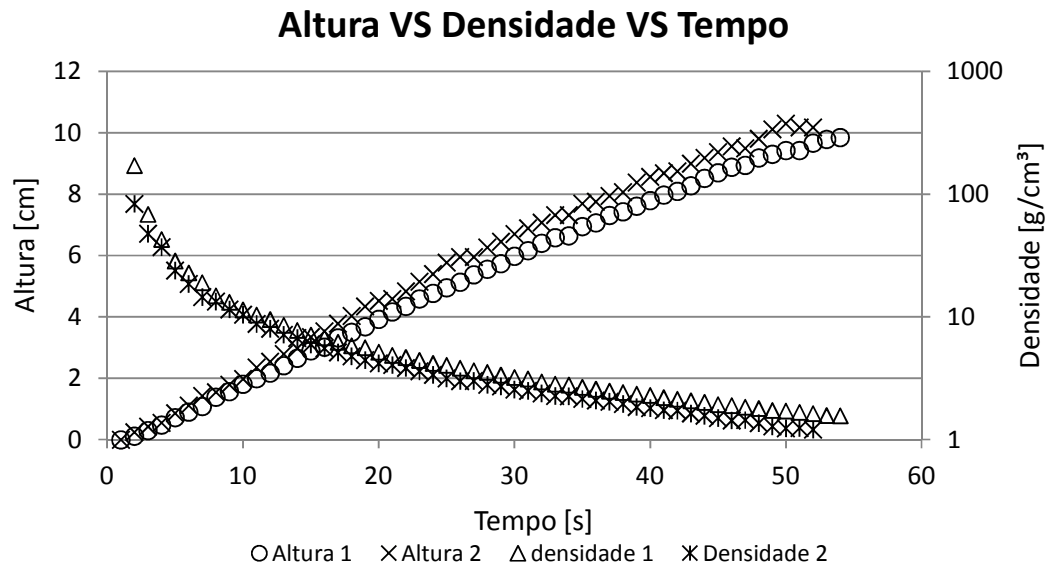


Figura 36 – Gráfico da variação da altura e densidade durante o processo de formação de espuma de PU.

7. CONCLUSÕES

Neste estudo, demonstrou-se a relevância da exploração de imagens digitais, obtidas com uma *webcam*, como uma técnica para o monitoramento de processos e análise química.

Por uma simples *webcam*, puderam-se obter em tempo real imagens em escala de cores RGB. A partir dessas imagens computaram-se os valores de seus pixels na vertical, dentro da região de interesse, com a detecção de movimento por comparação simples sendo capaz de monitorar a queda livre da esfera no viscosímetro de Stokes, levando a conhecer medida da viscosidade da glicerina; controlar o nível de líquido em tanques; monitorar o crescimento da espuma de poliuretano e relacionar sua expansão com a densidade e temperatura

No teste de viscosidade da glicerina foi obtido o valor de $9,3 \pm 0,3$ g/cm.s para viscosidade a mesma. Enquanto a viscosidade da glicerina pelo método de Brookfield foi de 9,21 g/cm.s, o que comprova que a técnica pode ser utilizada para tal propósito. Porém, vale ressaltar, a importância em conhecer a relação ideal dos diâmetros do tubo e esfera para faixa de viscosidade esperada.

O controle *on-off* do nível de líquido foi realizado com eficácia para o filtro do programa de 35%, tanto no comportamento regulatório quanto no servo. Em que o programa permite alterar os limites do nível e o *set-point* em tempo de execução.

Inicialmente a análise de expansão da espuma de poliuretano tinha por objetivo o estudo cinético da sua reação de formação. Porém, por motivos adversos não foi possível cumprir com o objetivo inicial. Dessa maneira foram realizados dois testes. No primeiro, o monitoramento da superfície em expansão da espuma de Pus, simultaneamente com o acompanhamento do peso da espuma durante a formação. Em ambos os procedimentos foram aplicados a técnica da análise de imagem, e comprovou-se a perda de peso

durante a formação da espuma. Em outro teste, foi avaliado o crescimento da espuma com a temperatura durante sua formação, em que foi comprovado que a reação de polimerização é exotérmica.

Cabe ressaltar que a escolha da região de interesse e filtro do programa para análise de imagem digital é fundamental para a aplicação satisfatória da técnica proposta.

Como maior vantagem da aplicação dos sistemas de monitoração de processos baseados em imagens está no fato de que, dificilmente, eles requerem alterações de grande porte nos sistemas aos quais se aplicam, além de empregarem equipamentos padronizados de fácil aquisição. Porém, para todo projeto no qual for cogitada a possibilidade de se empregar tal técnica, devem ser considerados os fatores: iluminação, de forma a tentar controlar-la; velocidade do movimento se é possível registrar tal evento de interesse dentro dos limites temporais disponíveis

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, M. P. de. **Processamento de imagens: Métodos e Análises**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT-RJ, 2002

ALVES, J. L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos**. Brasil: LTC, 2005.

ALVES, W. F. **Preparação e caracterização de blendas de poliuretano derivado do óleo de mamona e poli(*o*-metoxianilina) e sua avaliação como sensor**. (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual de São Paulo – USP. São Paulo, 2006.

ALVES, W. F. **Preparação e caracterização mecânica, térmica e elétrica da misturas de poliuretano derivado do petróleo de mamona e poli(*o*-metoxianilina) para avaliação como sensores para língua eletrônica**. (Tese de doutorado). Universidade Federal de São Carlos – UFScar. São Paulo, 2010.

AUDSLEY, N. **Flexible scheduling of hard real-time systems**. (Tese Phd). University of York, 1993.

BALABAN, M. O. Quantifying Nonhomogeneous Colors. In Agricultural Materials Part I: method development. **Journal of Food Science**, v. 73, n. 9, p. 431 – 437, Chicago, 2008.

BAOXIN, L. CHELLAPPA, R. Model-Based Temporal Object Verification Using Video. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.10, n.6, p.897-908, New York, 2001.

BARBOSA, J. L. L. **Processamento de imagens aplicado à monitoração de processos**. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2004.

BARNES, H. A., HUTTON, F. F., WALTERS, K. An Introduction to Rheology. **Elsevier Science B**. V.1, 1989.

BOVIK, A. Handbook of Image & Video. **Elsevier Academic Press**, 2nd ed., New York, USA, 2005.

BRANDSTETTER, M. C. G. O.; BUCAR R. S. **Proposta metodológica para identificação de falhas em processos produtivos mediante o uso de ferramentas de controle de qualidade e pesquisa operacional**. In: Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, RJ. p. 1-14, 2008.

BRODKEY, R. S. **The phenomena of fluid motions**. Addison-Wesley, 1967.

BUTTAZO, G. C. **Hard real-time computing systems**: Predictable scheduling algorithms and applications. Ed. Kluwer Academics Publishers, 1997.

CAMPOS, M. C. M. M; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamento e processos industriais**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

CAPPELARO, E. A.; MENDONÇA, F. C.; TEIXEIRA, J. **Você sabe o que é uma câmera digital?** Acessado através do endereço <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/trabalhos/camera.htm> em novembro de 2009.

CARVALHO, A. A. **Estudo para implementação de algoritmos clássicos para processamento digital de imagens**. (Monografia de graduação). Universidade Federal de Lavras – UFLA. Minas Gerais, 2003.

CARVALHO, J. L. M. **Sistemas de controle automático**. Brasil: LTC, 2000.

CASTLEMAN, K. R. **Digital image processing**. Prentice Hall, New Jersey, 667p, 1996.

DIAS, R. **Medição do nível de líquido utilizando processamento digital de imagem em sistemas automatizados**. (Dissertação de mestrado) – Universidade de Taubaté. – Unitau. Taubaté, 2009.

DOUGHERTY, E. R. **Digital image processing methods**. Marcel Dekker, New York, 1994.

FARINES; FRAGA; OLIVEIRA. **Sistemas de tempo-real**. Acessado através do endereço <http://www.lcmi.ufsc.br/romulo/discipli/cadcbtisa/escola-1.pdf> em novembro de 2009.

FAZANO, C. A. A aplicação da análise de imagem na quantificação das características microestruturais de materiais. **Revista Analytica**, n.19, p.46 – 60, 2005.

FERNANDES, L. S. L. **Controle feedback de nível baseado em sensor de imagem aplicado ao equipamento misturador-decantador à inversão de fases (MDIF)**. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. 100f . Natal, 2009.

FERREIRA, R. S. **Desenvolvimento de materiais poliméricos uretânicos para purificação de gás natural: remoção de mercúrio e compostos à base de enxofre**. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná - UFPR. CURITIBA, 2006.

GOMES, A. S. Preparação e caracterização de organobentonita modificada com ionenos alifáticos. **Polímeros: ciências e tecnologia**, v.15, n.3, p.212 – 217, 2005.

GONZÁLES, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. Editora Edgard Blücher, 510 p. São Paulo, 2002.

HAUPTMANN, P.; HOPPE, N.; PÜTTMER, A. **Application of ultrasonic sensors in the process industry**. Meas. Sci. Technol, v.13, n.8, R73–R83, 2002.

HINZE, J.O. **Turbulence**. McGraw-Hill, 1959.

KHAKHAR, D. V.; HARIKRISHNAN G. Modeling the dynamics of reactive foaming and film thinning in polyurethane foams. **AIChE Journal**, v.56, n.2, 2010.

KOPETZ, H. **Real-time and real-time systems**. In: Proceedings of Advanced Course on Distributed Systems. Estoril – Portugal, 1992.

KOYA, T. K. Sistema Automático para Contagem das Células do Sangue. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2001.

LUDWIG, B. W; URBAN, M. W. Quantitative determination of isocyanate concentration in crosslinked polyurethane coatings. **Journal of coatings Technology**, v.68, n.857, p.93-97, 1996.

LYRA, W. S. **Espectrometria de emissão em chama baseada em imagens digitais**. (Dissertação de mestrado). Universidade federal de João Pessoa – UFPB. 103p. João Pessoa, 2008.

MENDES, J.D. C. **Estimando Cobertura Vegetal por Análise de Imagens**. (Monografia de Graduação). Universidade Federal de Lavras – UFLA. 57 p. Minas Gerais, 2008.

OERTEL, G. **Polyurethane handbook**. 2nd. ed. Cincinnati: Hanser Gardner, 1993.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 3ª Ed., Editora S.A. Rio de Janeiro, 2000.

OLIVEIRA, C. R. S., PEREIRA, A. L., OLIVEIRA, I. N. Um ambiente para a prática remota de aulas laboratoriais de física - determinação da viscosidade de líquidos, **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v.17, n.1, 2009.

PRATT, W. K. **Digital Image Processing: PIKS Inside**. John Wiley and Sons, 3ª ed. Estados Unidos, 2001.

RAUTENBERG, J.; HENNING, B. **Novel approach level measurement in liquid tanks**. In: Proceedings of the Word Congress on Ultrasonics, p. 749–752. Paris - France, 2003.

RIVERA-ARMENTA, J. L.; HEINZE, T. MENDOZA-MARTINEZ, A. M. New polyurethane foams modified with cellulose derivatives. **European Polymer Journal**, v.40, p.2803-2812, 2004.

RUSS, J. C. **The image processing handbook**, CRC Press, Boca Raton, 1995.

SANGWINE, S. J.; REN, H. **The color image processing handbook**. Cambridge: Chapman & Hall, 1998.

SCOTT, D. M.; MCCANN, H. **Process imaging for automatic control**. Taylor & Francis group, LLC. USA, 2005.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. John Wiley & Sons: New York, 2003.

SERVES, V. **Espumas flexíveis de poliuretana à base de polióis de óleo de mamona etoxilado**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2007.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. **Principles and practice of automatic process control**. John Wiley & Sons, 2nd ed. New York, 1985.

STIEN, L. H.; MANNE, F.; RUOHONENE, K.; RUOHONENE, A.; RUNGRUANGSAKTORRISEN, K.; KIESSLING, A. Automated image analysis as a tool to quantify the colour and composition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* W.) cutlets. **Aquaculture**, v.261, p.695 – 705, 2006.

VILAR, W. **Química e Tecnologia do Poliuretano**. Vilar Consultoria 3ª Ed. Rio de Janeiro, 2002.

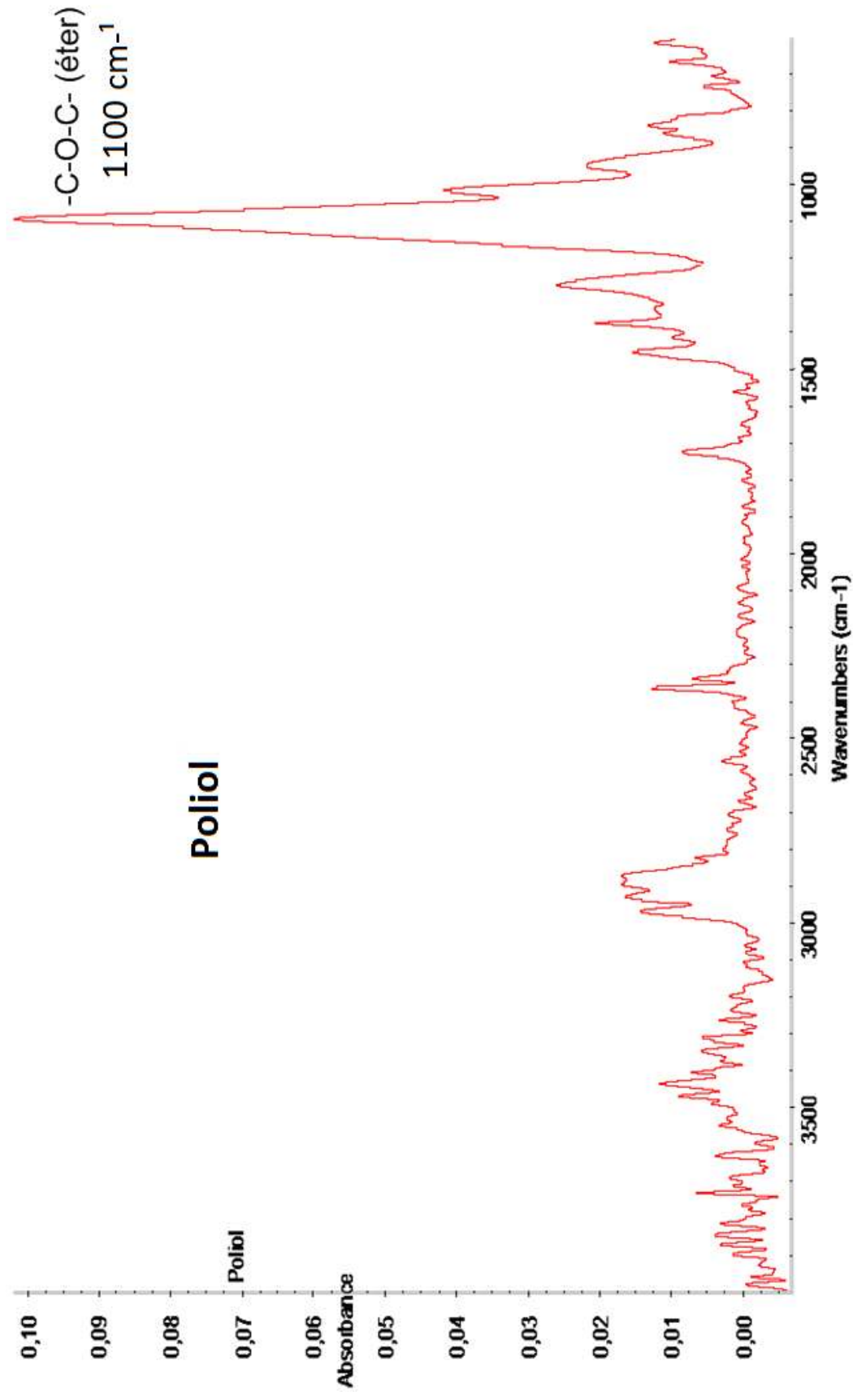
WANG, T. H.; MING, C. L.; CHEN, C. H.; CHENG, C. C.; JIA, D. T. Liquid-level measurement using a single digital camera, **Measurement**. V.42, p.604–610, 2009.

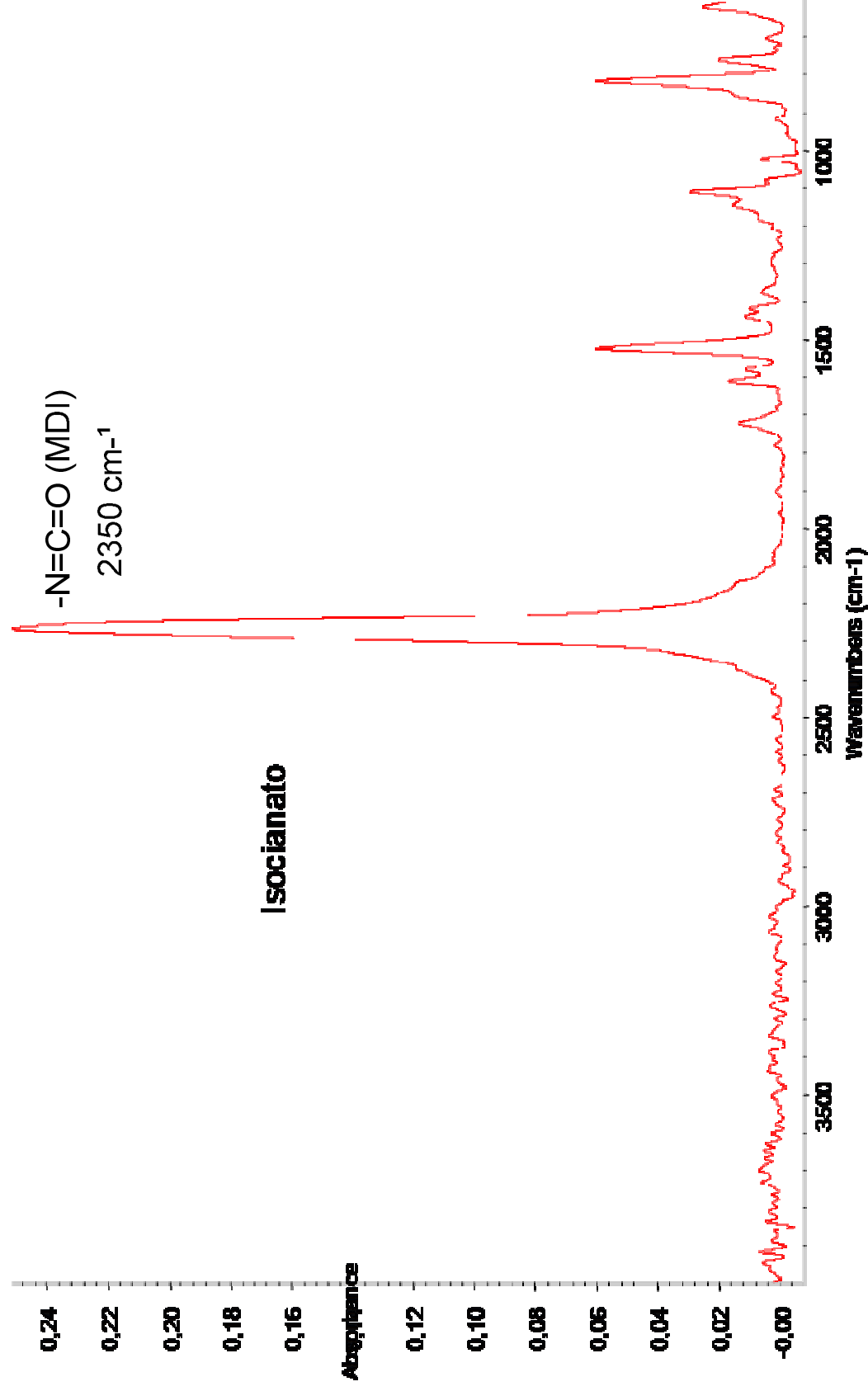
WHITE, F.M. **Viscous Fluid Flow**. 2nd ed. McGraw-Hill, 1991.

WOODS, G. **The ICI Polyurethanes Book**, Editora Wiley, 1987.

ANEXO 01

ANÁLISES DE IR DOS REAGENTES






ANEXO 02

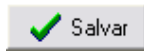
PROCEDIMIENTO OPERACIONAL DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

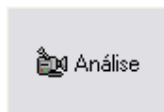
Procedimento Operacional do Programa de Determinação da Viscosidade


Iniciar o Programa.



Pressionar o botão , será aberta uma janela “Dados de entrada”, na qual o usuário deve fornecer os dados solicitados.

Ao acionar o botão , todos os dados fornecidos serão salvos e gravados em arquivo .txt na pasta do programa.



Pressionar o botão , será aberta um janela “Filmagem & Análise”, na qual é realizada o monitoramento do experimento,o processamento da imagem e a exibição do resultado da viscosidade.



Ao acionar o botão , inicia-se a filmagem.

Escolher o “Intervalo de aquisição” desejado, localizado no quadro filmagem, para captura de imagem.

Definir as coordenadas da região de interesse e a cor do fundo para realizar detecção do movimento. Com auxílio do mouse selecionar “Ponto Superior”, localizado no quadro Região de interesse, em seguida, escolher esse ponto no quadro da imagem processada. Repetir o procedimento do “Ponto Superior” para o “Ponto Inferior” e “Cor de Fundo”. As coordenadas de cada pixel da imagem são exibidas em caixas de texto abaixo do quadro da imagem processada.

Lançar a esfera no CENTRO da proveta (utilizar uma pinça).

O resultado da posição da esfera, velocidade da esfera no fluido e viscosidade do fluido é apresentado na tela do programa em caixas de texto, e também na forma de gráficos.

Procedimento Operacional do Programa de Controle de Nível de Líquido

Iniciar o Programa.

Ao acionar o botão , inicia-se a filmagem.

Escolher o intervalo de aquisição desejado, localizado no quadro filmagem, para captura de imagem.

Definir as coordenadas da região de interesse e a cor do fundo para realizar detecção do movimento. Com auxílio do mouse selecionar “Limite Superior”, localizado no quadro Região de interesse, em seguida, escolher esse limite no quadro da imagem processada. Repetir o procedimento do “Limite Superior” para o “Limite Inferior”, “SETPOINT” e “Cor de Fundo”. As coordenadas de cada pixel da imagem são exibidas em caixas de texto abaixo do quadro da imagem processada. É possível alterar

O monitoramento do nível de líquido é apresentado na tela do programa em gráficos.

Procedimento Operacional do Programa de Expansão de Poliuretanas

Iniciar o Programa.

Ao acionar o botão , inicia-se a filmagem.

Escolher o intervalo de aquisição desejado, localizado no quadro filmagem, para captura de imagem.

Definir as coordenadas da região de interesse e a cor do fundo para realizar detecção do movimento. Com auxílio do mouse selecionar “Ponto Superior”, localizado no quadro Região de interesse, em seguida, escolher esse limite no quadro da imagem processada. Repetir o procedimento do “Ponto Superior” para o “Ponto Inferior” e “Cor de Fundo”. As coordenadas de cada pixel da imagem são exibidas em caixas de texto abaixo do quadro da imagem processada. É possível alterar

O monitoramento da superfície em expansão da espuma de poliuretano é apresentado na tela do programa na forma de gráfico.